

Белорусский национальный технический университет

Энергетический факультет

Кафедра «Электротехника и электроника»

СОГЛАСОВАНО

Заведующий кафедрой

Бладыко Ю.В.

_____ 28.02.2019 г .

СОГЛАСОВАНО

Декан факультета

Пономаренко Е.Г.

_____ 28.02.2019 г .

ЭЛЕКТРОННЫЙ УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ

Э Л Е К Т Р О Н И К А

для специальности

1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»

Составители: Бладыко Ю.В., Матвеев И.П., Жуковская Т.Е.

Рассмотрено и утверждено

на заседании совета энергетического факультета 28.02.2019 г.

протокол № 7

Перечень материалов

Теоретический раздел

- тематический конспект лекций

Практический раздел

- материалы лабораторных занятий

Контроль знаний

- экзаменационные вопросы;
- задания для самостоятельной работы

Вспомогательный раздел

- учебная программа;
- методическая карта дисциплины;
- рекомендуемая литература;
- словарь терминов

Пояснительная записка

Цели данного ЭУМК – повышение эффективности организации учебного процесса с использованием дистанционных технологий; представление возможности студентам заниматься самообразованием, пользуясь комплектом учебно-методических материалов по курсу «Электроника».

ЭУМК содержит четыре раздела: теоретический, практический, контроля знаний и вспомогательный раздел. В теоретическом разделе представлен лекционный материал в соответствии с основными разделами и темами учебной программы. Практический раздел включает лабораторный практикум. Раздел контроля знаний включает контрольные вопросы, а также задания и тесты для организации самостоятельной работы студента. Вспомогательный раздел содержит основные разделы учебной программы дисциплины, методическую карту дисциплины, список рекомендуемой литературы, словарь терминов и определений.

Материалы учебно-методического комплекса представлены в формате PDF. Учебные материалы структурированы по разделам. ЭУМК содержит перекрестные и гиперссылки, позволяющие оперативно найти необходимый материал, перейти к нужной теме. Предусматривается так же навигация по разделам через закладки PDF формата, что обеспечивающая возможность быстрого поиска требуемой информации и быстрый возврат к предыдущей информации

Открытие ЭУМК производится посредством запуска файла *ELEKTRONIKA.pdf*

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Модуль 1 Элементная база электроники

- [Введение. Свойство полупроводников](#)
- [Полупроводниковые диоды](#)
- [Полупроводниковые транзисторы](#)
- [Тиристоры](#)
- [Элементы электронных устройств](#)

Модуль 2 Аналоговые устройства

- [Неуправляемые выпрямители](#)
- [Сглаживающие фильтры](#)
- [Стабилизаторы](#)
- [Управляемые выпрямители](#)
- [Электронные усилители](#)
- [Усилительный каскад](#)
- [Усилители мощности](#)
- [Операционный усилитель](#)

Модуль 3 Цифровые устройства

- [Импульсный сигнал](#)
- [Логические элементы](#)
- [Триггеры](#)
- [Счетчики импульсов](#)
- [Регистры](#)
- [Комбинационные устройства](#)
- [Генераторы импульсов](#)

ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Список лабораторных работ

[Л.Р. №1 «ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ И ТИРИСТОРОВ»](#)

[Л.Р. №2 «ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕВОГО И БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА»](#)

[Л.Р. №3 ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ С ФИЛЬТРАМИ](#)

[Л.Р. №4 ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛИЗАТОРОВ ПОСТОЯННОГО](#)

[НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА](#)

[Л.Р. №5 ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ](#)

[Л.Р. №6 ЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ И МИКРОСХЕМЫ](#)

[Л.Р. №7 КОМБИНАЦИОННЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ](#)

[Л.Р. №8 ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИГГЕРНЫХ СХЕМ](#)

[Л.Р. №9 СЧЕТЧИКИ ИМПУЛЬСОВ И РЕГИСТРЫ](#)

[Л.Р. №10 ИССЛЕДОВАНИЕ НА ПЭВМ КАСКАДА УСИЛЕНИЯ НА БИПОЛЯРНОМ](#)

[ТРАНЗИСТОРЕ ПО СХЕМЕ ОЭ](#)

[Л.Р. №11 ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ](#)

[Л.Р. №12 УПРАВЛЯЕМЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ](#)

[Л.Р. №13 ФОТО- И ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ](#)

[Л.Р. №14 ИССЛЕДОВАНИЕ АРИФМЕТИКО-ЛОГИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА](#)

[Л.Р. №15 ИССЛЕДОВАНИЕ ЦАП И АЦП](#)

[Л.Р. №16 ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И АВТОМАТИКИ](#)

КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

[Экзаменационные вопросы](#)

[Вопросы самостоятельной работы](#)

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

[Содержание учебного материала](#)

[Учебно-методическая карта дисциплины](#)

[Список литературы](#)

[Словарь терминов](#)

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Модуль 1 Элементная база электроники

Введение

Электроника область науки, техники и производства изучающая принципы функционирования, разработку и применение устройств работа которых основана на протекании тока в твердом теле, вакууме и газе. Приборы электроники подразделяют на: *аналоговые*, обеспечивающие обработку непрерывного сигнала; и *импульсные*, в которых обрабатываемый сигнал представляет дискретную функцию.

По области применения различают энергетические и информационные устройства электроники. Энергетическая электроника включает устройства, обеспечивающие преобразование одного вида электрической энергии в другой и изменение параметров электрического сигнала. Информационная электроника занимается устройствами для приема, передачи, обработки, хранения и отображения информации.

Сфера применения электроники постоянно расширяется. В основе современной электроники лежит применение полупроводниковых приборов, что позволяет снижать потребление электрической мощности, уменьшать габариты, массу, современных устройств электроники. В информационной электронике применение полупроводниковых структур позволяет увеличивать объём обрабатываемой информации в единицу времени не снижая качества обработки информации.

ТЕМА 1. СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Основы теории электропроводности

В теории электропроводности твердых тел указывается, что энергия каждого электрона может принимать лишь определенные значения, которые называются *энергетическими уровнями*. Электроны, расположенные ближе к ядру атома, обладают меньшими энергиями, т.е. находятся на более низких энергетических уровнях, а удаленные от ядра электроны находятся на более высоких энергетических уровнях, т.е. обладают большей энергией.

Когда электрон переходит с более высокого энергетического уровня на более низкий, выделяется количество энергии (квант энергии или фотон), которую теряет атом. Если атом поглощает квант энергии, то электрон переходит с более низкого энергетического уровня на более высокий. Такие электроны начинают свободно перемещаться в объеме и называются *свободными носителями зарядов*.

Свободная зона, на уровнях которой при возбуждении могут находиться электроны, называется *зоной проводимости*. Зона, ближайшая к зоне проводимости, называется *валентной*. При изменении температуры происходит обмен носителями зарядов между валентной зоной и зоной проводимости (рис. 1.1).

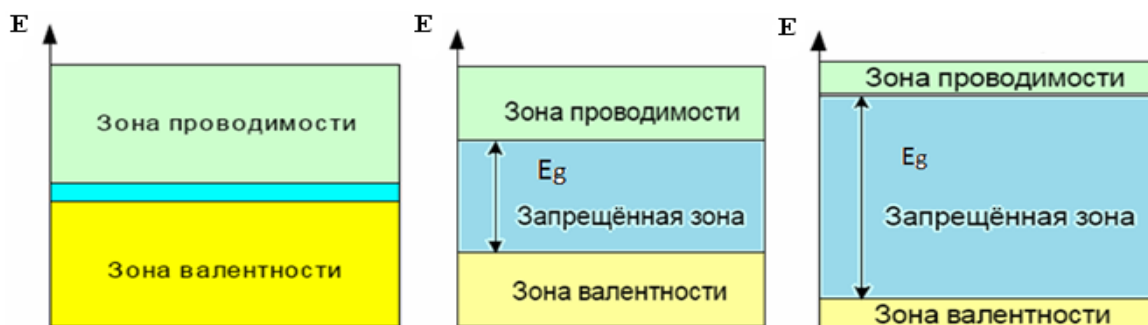


Рисунок 1.1 Зонная диаграмма металла, полупроводника и диэлектрика

С возрастанием температуры электроны, получившие дополнительную тепловую энергию, разрывают такие ковалентные связи и становятся свободными носителями заряда. Таким образом, для перевода электронов в свободное состояние необходимо сообщить ему дополнительное количество энергии, которое обозначается E_g .

В диэлектриках величина дополнительной энергии E_g , необходимой для перевода электрона из валентной зоны в зону проводимости, значительно больше, чем у полупроводников.

Уход электрона из валентной зоны приводит к образованию в ней незаполненного энергетического уровня. Такое вакантное энергетическое место носит название «дырка» и оно равносильно наличию в данном месте положительного заряда. В технической литературе дырки обозначают буквой p , а электроны буквой n .

Электропроводность полупроводников

Появление электронов в зоне проводимости означает, что полупроводник становится электропроводящим. Эта электропроводность является следствием нарушения валентных связей и называется *собственной электропроводностью*.

На электропроводность полупроводника существенное влияние оказывает наличие в нем атомов примесей. Электропроводность, обусловленную движением свободных электронов, называют электронной, а электропроводность, обусловленную движением дырок – дырочной.

Примесная электропроводность полупроводников

В зависимости от рода введенной примеси в полупроводниках преобладает либо электронная электропроводность (n -типа, от латинского negative – отрицательный) либо дырочная электропроводность (p -типа, от латинского positive – положительный). Примеси могут быть донорного и акцепторного типа.

Примесный атом, отдающий электрон, называют донорным. Донорные примеси образуются при введении в кристаллическую решётку полупроводника (обычно кремния Si или германия Ge, которые являются четырехвалентными) атомов фосфора P, мышьяка As или других веществ, которые имеют на внешней электронной оболочке пять валентных электронов. Он замещает один из атомов Ge (Si) в кристаллической решетке, образуя двухвалентные связи с четырьмя атомами (рис. 1.2, б).

Пятый валентный электрон атома фосфора, оказывающийся «лишним», образует электрон проводимости. При увеличении содержания атомов примеси возрастает число электронов в зоне проводимости, а число дырок не меняется. Ток переносится в основном электронами. В этом случае электроны являются основными носителями заряда, а дырки – неосновными. Полупроводник называется в этом случае полупроводником *n*-типа.

Акцепторные примеси образуются введением в кристаллическую решетку полупроводника атомов бора В, индия In, галлия Ga или других трехвалентных элементов. Атом акцептора также занимает место в кристаллической решётке, но обменивается с соседними четырьмя атомами только тремя электронами (рис. 1.2, в).

На образование связи с одним из соседних атомов Ge (Si) у атомов индия не хватает одного электрона, т.е. между этими двумя атомами возникает незаполненная валентная связь, или дырка. При увеличении акцепторной примеси возрастает концентрация дырок и они становятся основными носителями, а электроны – неосновными. Полупроводник называется в этом случае полупроводником *p*-типа.

Кристаллические структуры таких полупроводников показаны на рис. 1.2.

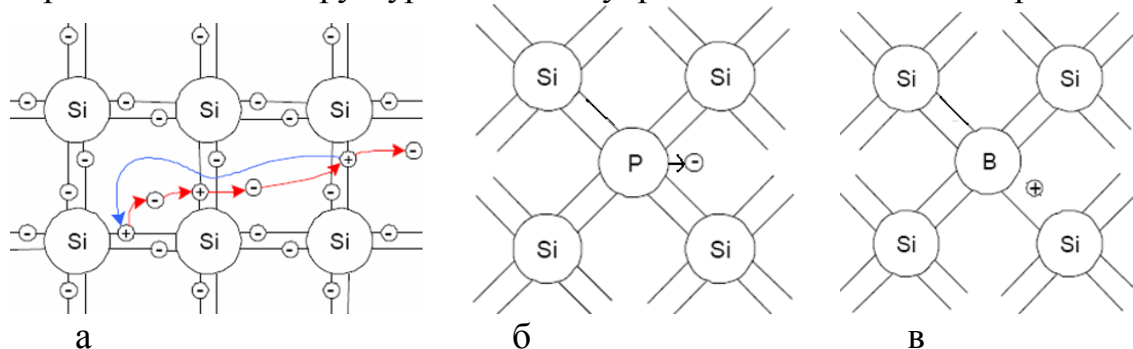


Рисунок 1.2 Кристаллические структуры чистого полупроводника (а), полупроводника с донорной (б) и акцепторной (в) примесью

Процесс перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости является обратимым, то есть электрон из зоны проводимости может перейти в валентную зону, теряя при этом энергию. При таком переходе электрон заполняет свободный уровень в валентной зоне. Этот процесс, обратный генерации, называется рекомбинацией.

Полупроводниковые материалы

К полупроводникам относятся кремний, германий, селен, теллур, большинство оксидов металлов и всё разнообразие руд и минералов, встречающихся в природе. Полупроводники по величине электропроводности занимают промежуточное место между проводниками и диэлектриками.

Основными материалами для изготовления полупроводниковых приборов являются кремний (Si) и германий (Ge). Большая механическая прочность и химическая устойчивость этих материалов обеспечивают надёжность работы изготавливаемых полупроводниковых приборов, а также достаточно большой срок их службы.

ТЕМА 2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

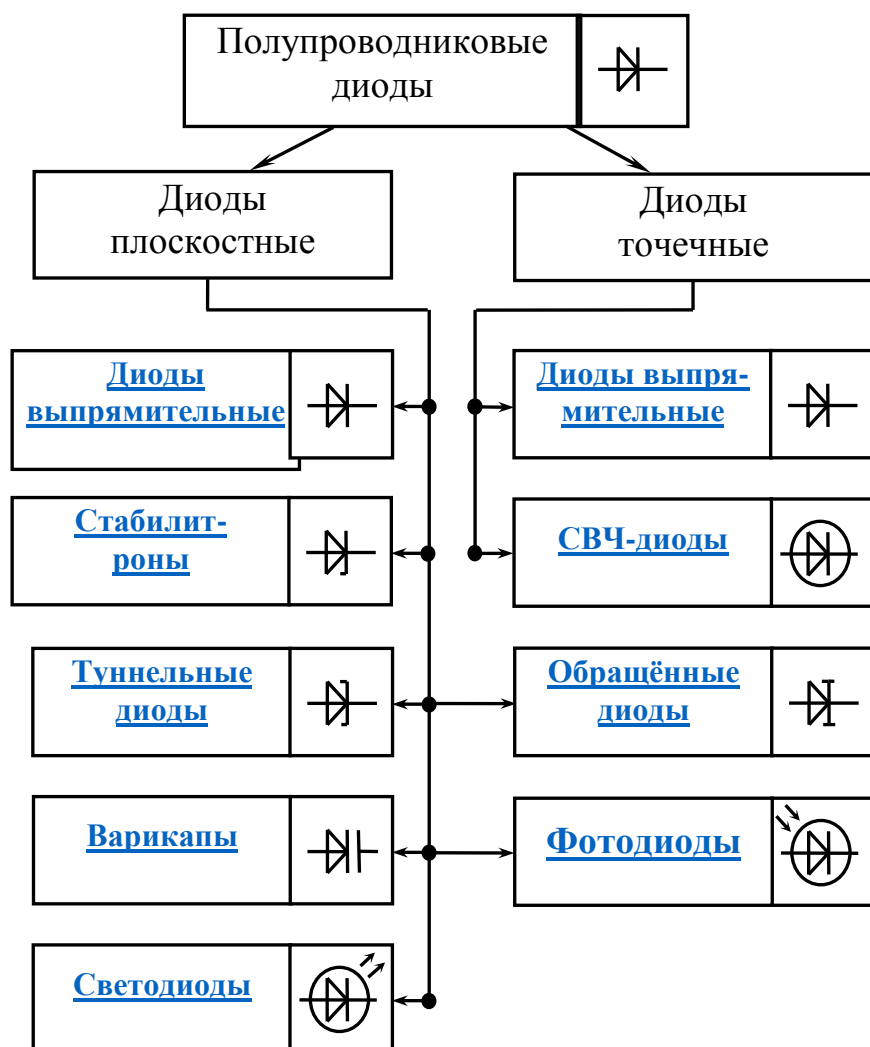


Рисунок 2.1 Классификация и условные графические обозначения полупроводниковых

графические обозначения полупроводниковых диодов.

Выпрямительные диоды предназначены для преобразования переменного тока низкой частоты в постоянный ток. Вольтамперная характеристика (ВАХ) выпрямительного диода, его условное графическое изображение и буквенное обозначение приведены на рис. 2.2. Основные параметры выпрямительного диода: предельно допустимый постоянный ток диода $I_{пр.мах}$ и максимально допустимое обратное напряжение $U_{обр.мах}$.

Диод – полупроводниковый прибор с одним n - p -переходом и двумя внешними выводами **анод** и **катод**. По назначению диоды делят на выпрямительные, высокочастотные, импульсные, стабилитроны и т.д. Их изготавливают на основе германия или кремния. По технологии исполнения различают точечные, плоскостные (сплавные) и диффузионные диоды. Точечный диод получают при вплавлении металлической проволоки в пластину полупроводника. Плоскостные диоды получают при сплавлении пластин либо внесении примеси посредством диффузии. На рис. 2.1 представлена классификация и условные

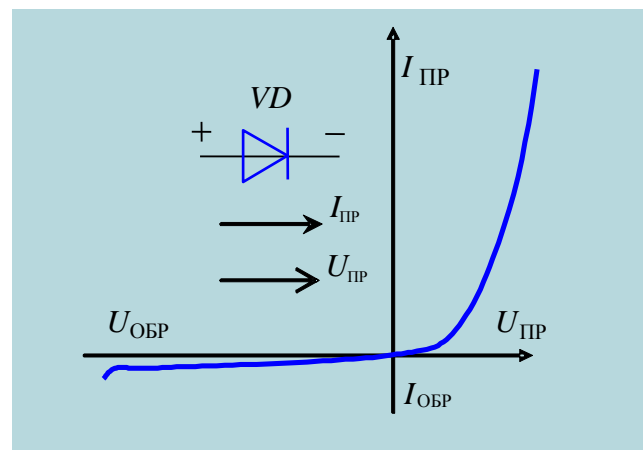


Рисунок 2.2 ВАХ диода

Стабилитрон

представляет собой кремниевый полупроводниковый диод, который нормально работает при электрическом пробое n - p -перехода. При этом напряжение на диоде незначительно зависит от протекающего тока. Электрический пробой не вызывает разрушения перехода, если ограничить ток до допустимой величины. Стабилитроны применяют для стабилизации постоянного напряжения. ВАХ стабилитрона и его условное графическое обозначение приведены на рис. 2.3.

Основные параметры стабилитрона: напряжение стабилизации $U_{ст.ном}$, минимальный $I_{ст.мин}$ и максимальный $I_{ст.мах}$ токи стабилизации, максимальная мощность $P_{ст.мах}$.

Светодиод – полупроводниковый прибор с одним или несколькими электрическими переходами, преобразующий электрическую энергию в энергию обычного светового излучения. Явление свечения в светодиоде называется инжекционной электролюминесценцией. Основой светодиода является p - n - переход, смещенный внешним источником напряжения в проводящем направлении.

При прямом смещении потенциальный барьер n - p перехода понижается и происходит инжекция электронов в p -область и дырок в n -область. В процессе рекомбинации носителей

заряда в n - p переходе энергия выделяется в виде фотонов, то есть процесс рекомбинации сопровождается световым излучением, частота которого определяет спектр излучения. Основными материалами для изготовления светодиодов служат арсенид галлия ($GaAs$), селенид цинка ($ZnSe$) фосфит галлия (GaP), нитрид галлия (GaN), индия-галлия нитрид ($InGaN$). Варьируя состав полупроводников, можно создавать светодиоды для всевозможных длин волн от ультрафиолета (GaN) до среднего инфракрасного диапазона (PbS)

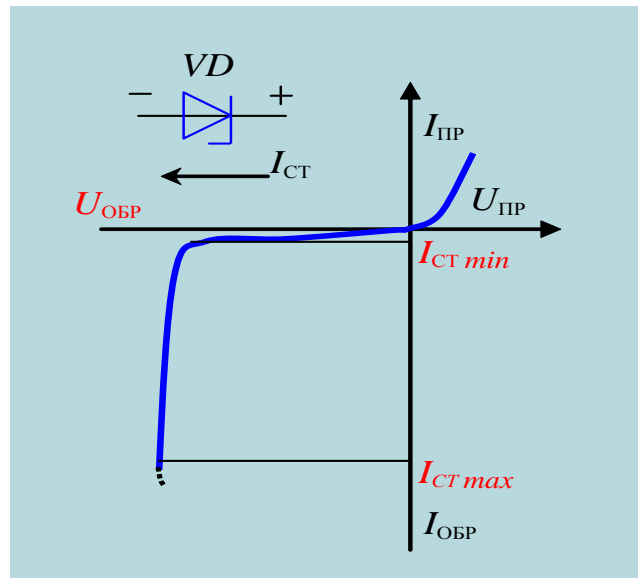


Рисунок 2.3
ВАХ стабилитрона

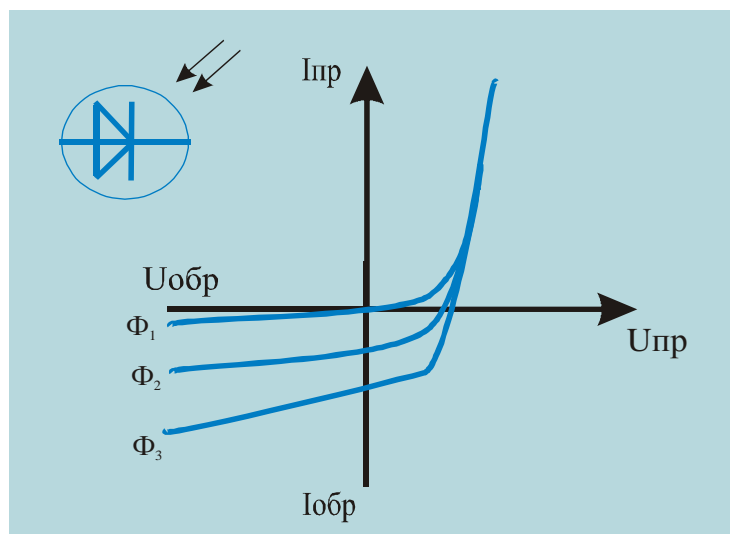


Рисунок 2.4 ВАХ фотодиода

Светодиоды нашли применение в световых индикаторах, табло, приборных панелях автомобилей и самолетов, рекламных экранах, различных системах визуализации информации. По светоотдаче, долговечности, надежности превосходят обычные лампы накаливания.

Основные параметры светодиодов:

1. Сила света I_v – световой поток, приходящийся на единицу телесного угла в заданном направлении (составляет десятые доли – единица мКд);
2. Яркость излучения равна отношению силы света к площади светящейся поверхности (составляет десятки-сотни Кд/см²);
3. Постоянное прямое напряжение (2...4 В);
4. Цвет свечения или длина волны, соответствующая максимальному световому потоку;
5. Максимально допустимый постоянный прямой ток (составляет десятки мА);
6. Максимально допустимое постоянное обратное напряжение (единицы В);
7. Быстродействие излучающего диода ($\tau = 10^{-6} \dots 10^{-9}$ сек.), определяемое временем переключения $t_{пер.}$;
8. Диапазон температур окружающей среды ($T_0 = -60 \dots +70$ °С);
9. Срок службы – составляет 104...106 часов.

Недостатком светодиодов является зависимость их параметров от температуры. Выпускаются светодиоды в виде точечных приборов, в виде матричных панелей и в виде знаковосинтезирующих индикаторов.

Фотодиод – это полупроводниковый прибор, принцип действия которого основан на использовании внутреннего фотоэффекта – генерации носителей заряда в полупроводнике под действием светового потока.

Работает в двух режимах: фотопреобразовательном и фотогенераторном.

В *фотопреобразовательном* режиме под воздействием светового потока Φ увеличивается обратный ток фотодиода. Такие диоды используют в устройствах, реагирующих на свет.

В *фотогенераторном* режиме диод работает как источник электрической энергии, преобразующий энергию света в электрическую. ВАХ фотодиода представлена на рис. 2.4.

Туннельный диод – полупроводниковый диод на основе вырожденного полупроводника, в котором туннельный эффект приводит к появлению на вольт-амперных характеристиках (рис. 2.5) при прямом напряжении участка с отрицательной дифференциальной электрической проводимостью

Материалом для туннельных диодов служит сильнолегированный германий или арсенид галлия.

Основными параметрами туннельного диода являются ток пика $I_{\text{п}}$ и отношение тока пика к току впадины $I_{\text{п}} / I_{\text{в}}$

Для выпускаемых диодов $I_{\text{п}} = 0,1 \dots 1000$ мА и $I_{\text{п}} / I_{\text{в}} = 5 \dots 20$.

Туннельные диоды относятся к быстродействующим полупроводниковым приборам и применяются в генераторах высокочастотных колебаний и импульсных переключателях.

Обращённый диод – диод на основе полупроводника с критической концентрацией примесей, в котором электрическая проводимость при обратном напряжении вследствие туннельного эффекта значительно больше, чем при прямом напряжении. Обращённые диоды представляют собой разновидность туннельных диодов, у которых ток пика $I_{\text{пр}} = 0$. Если к обращённому диоду приложить прямое напряжение $U_{\text{пр}} \leq 0,3$ В, то ток диода $I_{\text{пр}} \approx 0$ А, в то же время даже при небольшом обратном напряжении (порядка десятков милливольт) обратный ток достигает нескольких миллиампер.

Таким образом, обращённые диоды обладают вентильными свойствами при малых напряжениях именно в той области, где выпрямительные диоды обычно вентильными свойствами не обладают. При этом направлением наибольшей проводимости является направление, соответствующее обратному току. (Рис. 2.6)

Варикап – полупроводниковый диод, в котором используется зависимость ёмкости p - n -перехода от обратного напряжения и который предназначен для применения в

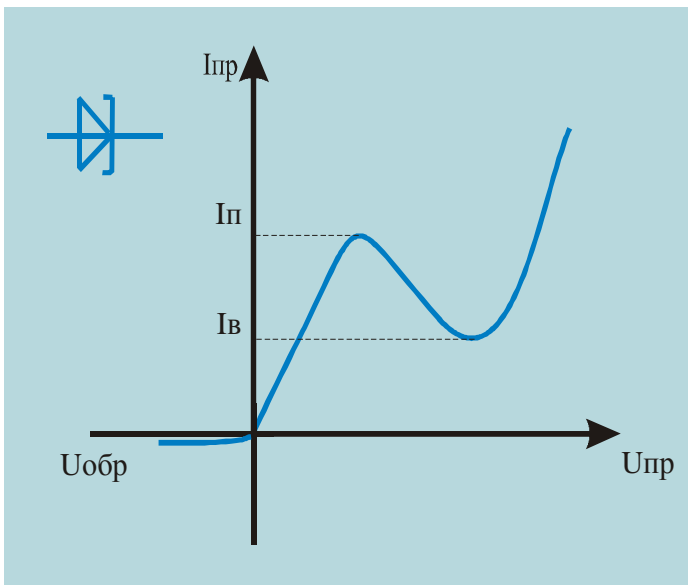


Рис 2.5 Туннельный диод

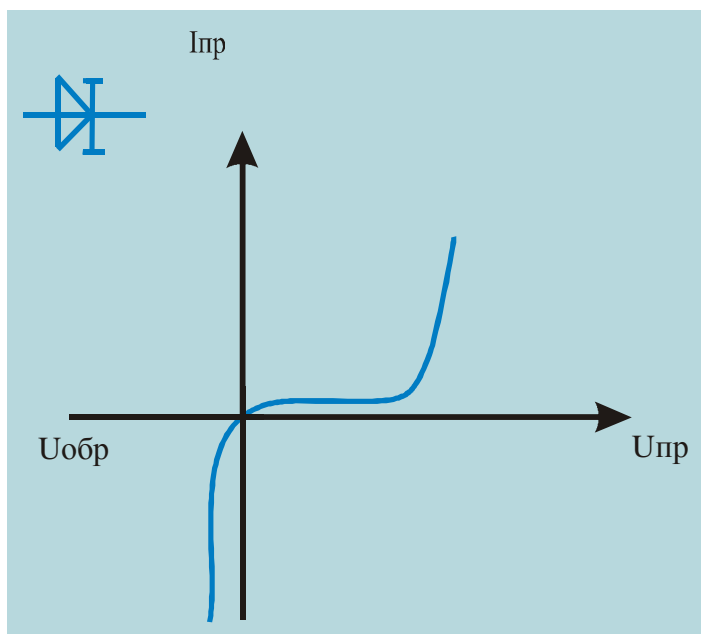


Рисунок 2.6 Обращенный диод

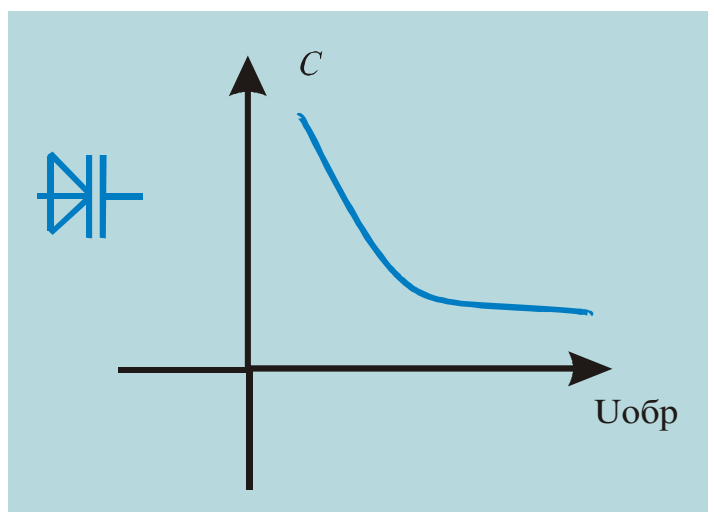


Рисунок 2.7 Варикап

качестве элемента с электрически управляемой ёмкостью.

Основными параметрами варикапа являются общая ёмкость C_v , которая фиксируется обычно при небольшом обратном напряжении $U_{обр} = 2 \dots 5$ В, и коэффициент перекрытия по ёмкости $K_C = C_{max} / C_{min}$. Для большинства выпускаемых варикапов $C = 10 \dots 500$ пФ и $K_C = 5 \dots 20$.

Варикапы применяют в системах дистанционного управления и автоматической подстройки частоты и в параметрических усилителях с малым уровнем собственных шумов. Варикап – это диод, принцип действия которого основан на емкостном свойстве р-п-перехода. Зависимость $C = f(U)$ приведена на рис 2.7. Используется в устройствах автоматической подстройки частоты (АПЧ).

СВЧ-диод – предназначен для преобразования и обработки сверхвысокочастотного сигнала (до десятков и сотен гигагерц). СВЧ – диоды применяются в устройствах генерации и усиления электромагнитных колебаний СВЧ диапазона, умножения частоты, модуляции, генерирования сигналов и т.д.

Диод Шотки – получают, используя переход металл – полупроводник. В месте контакта возникает обедненный слой полупроводника, называемый запиорным. Ток через контакт металл – полупроводник, в отличие от тока через электронно-дырочный переход, обусловлен только основными носителями заряда.

Отличительные особенности диода Шотки по сравнению с диодами других типов: более низкое прямое падение напряжения; малая инерционность; высокое быстродействие; низкий уровень ВЧ шумов; простота изготовления. Вольт амперная характеристика диода с переходом металл – полупроводник из – за малого сопротивления, ближе к идеальной. Диод Шотки применяют как СВЧ-диод различного назначения (детекторного, лавинно-пролётного, параметрического, импульсного); кроме того, применяют в качестве приёмников излучения, детекторов ядерного излучения, тензодатчиков, модуляторов света; их используют также в низковольтных высокочастотных выпрямителях.

ТЕМА 3. ТРАНЗИСТОРЫ

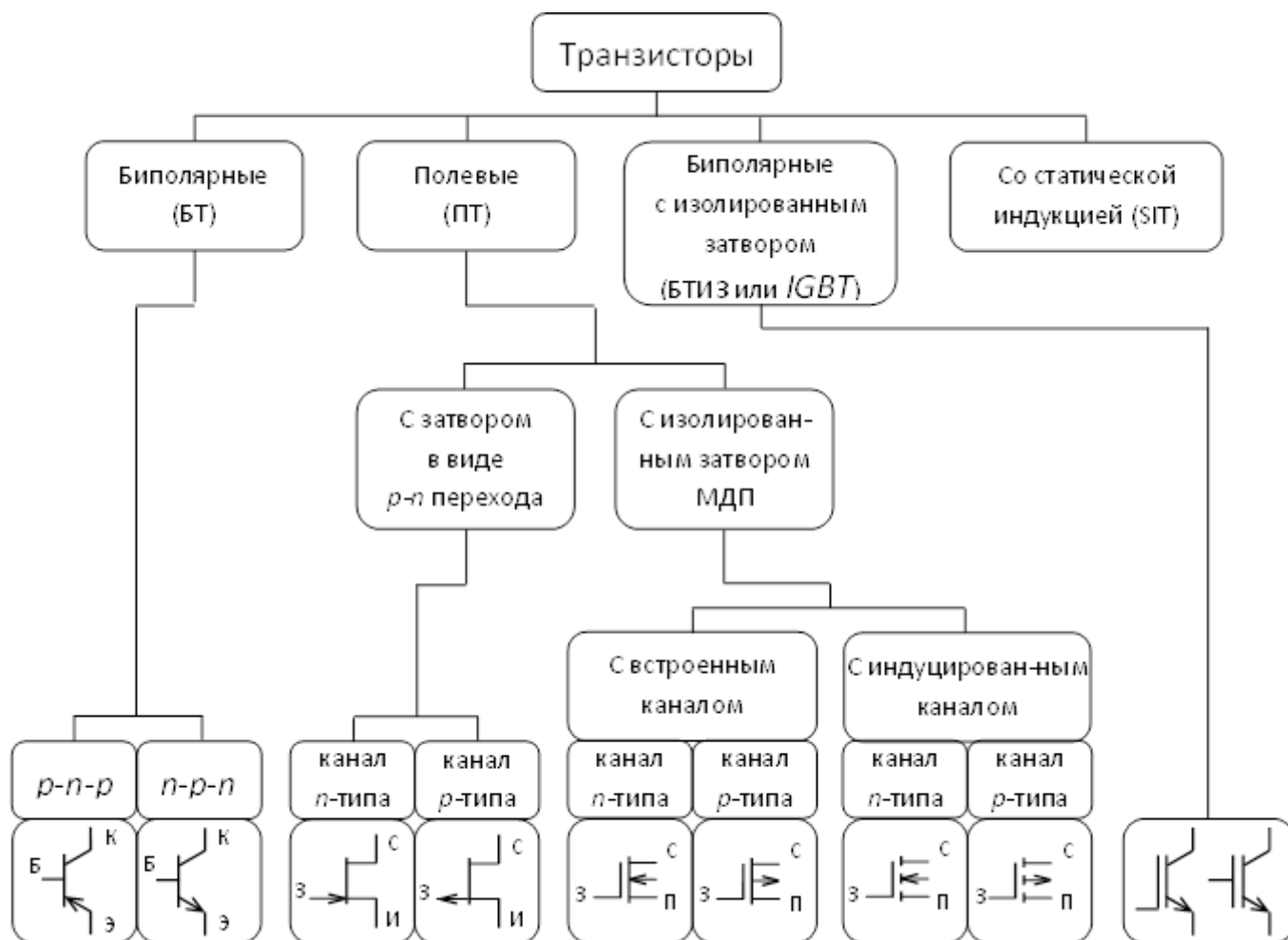


Рисунок. 3.1

3.1 Биполярные транзисторы

Биполярным транзистором называют полупроводниковый прибор с двумя *n-p*-переходами, образованными слоями полупроводникового материала *n-p-n* или *p-n-p*-типа. Он имеет три или более выводов, изготавливается на основе германия или кремния, обеспечивает усиление мощности электрических сигналов. На рис. 3.2 приведены структурные схемы, условные графические и буквенные обозначения транзисторов *n-p-n*-типа (рис. 3.2, а) и *p-n-p*-типа (рис. 3.2, б).

Средний слой кристалла называют базой (Б). Ее толщина мала, составляет несколько микрон и концентрация примесей здесь значительно меньше, чем в соседних слоях. Крайние слои называют эмиттером (Э) и коллектором (К).

Для нормальной работы транзистора между его выводами должны быть включены источники питания. Если источники включены так, что оба перехода П1, П2 находятся под обратным напряжением, то токи транзистора практически равны нулю – этот режим называют *отсечкой*.

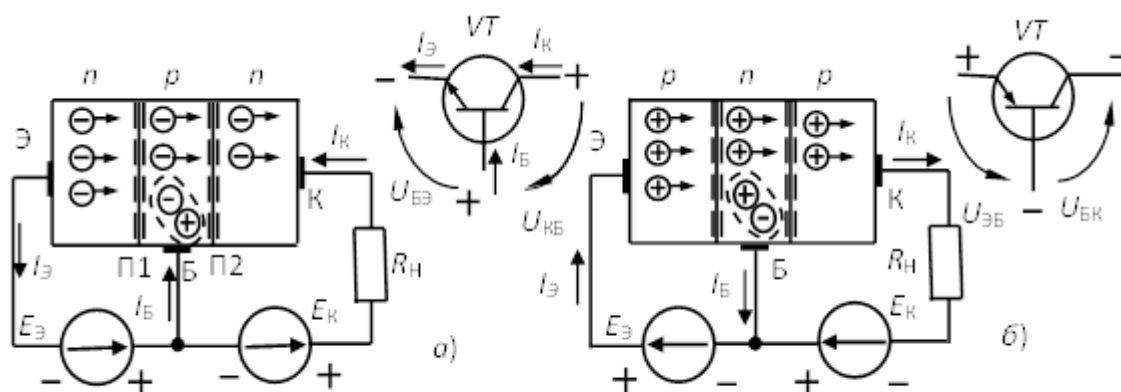


Рисунок. 3.2 Биполярные транзисторы

Если переходы транзистора имеют прямое смещение, то их сопротивление мало, и транзистор можно рассматривать как узел цепи. Такой режим работы называют *насыщением*. В усилительном каскаде транзистор работает в активном режиме, при этом эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный – в обратном (рис. 3.2). Прямосмещенный эмиттерный переход имеет небольшое сопротивление – несколько ом. Коллекторный переход, при отсутствии инжекции из эмиттера, имеет очень большое сопротивление – несколько мегаом, поэтому в цепь коллектора можно включать нагрузку с большим сопротивлением, практически не изменяя тока коллектора.

Под действием источника $E_Э$ основные носители заряда из эмиттера преодолевают *n-p*-переход и попадают в область базы, где частично рекомбинируют с основными носителями заряда базы, образуя ток базы $I_Б$. Так как концентрация основных носителей заряда в базе мала (дыроч в *n-p-n*-типе и электронов в *p-n-p*-типе), то и число рекомбинаций в базе незначительно, ток базы мал. Большинство зарядов, инжектированных в область базы из эмиттера, под действием поля источника $E_К$ и вследствие диффузии, преодолевают коллекторный переход и образуют ток коллектора.

Коэффициент передачи тока эмиттера

$$\alpha = \Delta I_K / \Delta I_Э \text{ при } U_{КБ} = \text{const.}$$

В современных транзисторах база очень тонкая и $\alpha = 0.9 \dots 0.995$.

Рассмотренная на рис. 3.2 схема включения транзистора называется схемой с общей базой (ОБ), так как база является общим электродом для входной и выходной цепей. Она обеспечивает усиление сигнала по напряжению и мощности, но ток в нагрузке будет меньше, чем входной ток источника сигнала.

Наиболее часто используется в электронных устройствах схема включения транзистора с общим эмиттером (ОЭ) – рис. 3.3, а. Входным здесь является ток базы $I_Б$, а выходным – ток коллектора $I_К$.

Коэффициент передачи тока базы схемы ОЭ

$$\beta = \Delta I_K / \Delta I_B \text{ при } U_{KЭ} = \text{const}; \quad \beta = \alpha / (1 - \alpha); \quad \beta \gg 1.$$

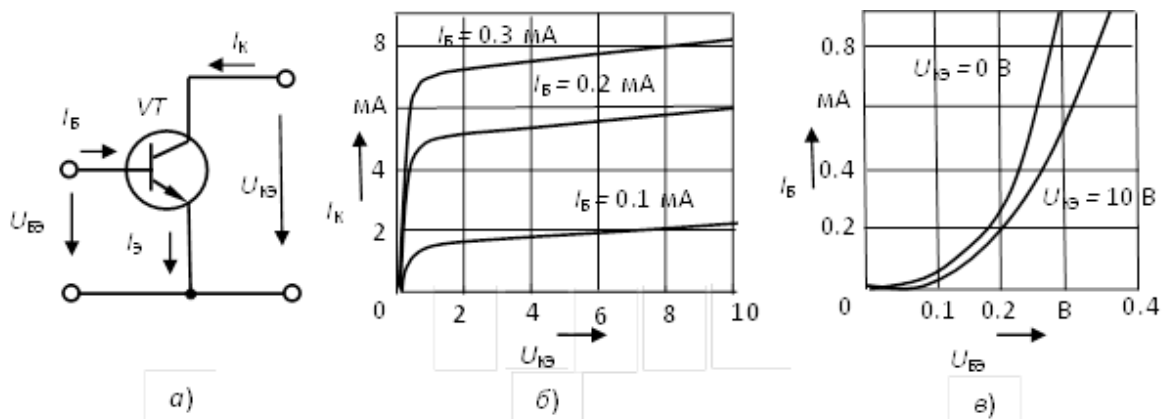


Рисунок. 3.3 Включение биполярного транзистора с общим эмиттером

Эта схема обеспечивает усиление сигнала по току, напряжению и максимальное усиление по мощности.

Работу транзисторов включенных по схеме с [ОЭ](#) описывают семейства входных и выходных характеристик:

- 1) выходные – $I_K(U_{KЭ})$ при $I_B = \text{const}$ (рис. 3.3, б),
- 2) входные – $I_B(U_{БЭ})$ при $U_{KЭ} = \text{const}$ (рис. 3.3, в).

Они определяют связь между постоянными составляющими токов и напряжений, дают возможность выбрать наилучший режим работы, оценить нелинейные искажения усиливаемого сигнала.

Для расчета цепей с биполярными транзисторами используют h - параметры: транзистор представляют четырехполюсником и записывают уравнения четырехполюсника в h - параметрах.

$$\begin{cases} \Delta U_{БЭ} = h_{11} \Delta I_B + h_{12} \Delta U_{КЭ} \\ \Delta I_K = h_{21} \Delta I_B + h_{22} \Delta U_{КЭ} \end{cases}$$

Коэффициенты четырехполюсника (h - параметры) выражаются следующим образом:

$$h_{11} = \Delta U_{БЭ} / \Delta I_B \text{ при } U_{КЭ} = \text{const} - \text{входное сопротивление } R_{вх}, \text{ Ом};$$

$h_{12} = \Delta U_{БЭ} / \Delta U_{КЭ} \text{ при } I_B = \text{const} - \text{безразмерный коэффициент обратной связи по напряжению};$

$h_{21} = \Delta I_K / \Delta I_B \text{ при } U_{КЭ} = \text{const} - \text{безразмерный коэффициент передачи тока } (\beta);$

$$h_{22} = \Delta I_K / \Delta U_{КЭ} \text{ при } I_B = \text{const} - \text{выходная проводимость } (1 / R_{вых}), \text{ См.}$$

h - параметры приводятся в справочниках, а также могут быть определены по семейству входных и выходных характеристик транзистора.

Области работы транзистора. На выходных характеристиках можно выделить три области работы транзистора (рис. 3.4): насыщения (I); линейной работы (II); отсечки (III).

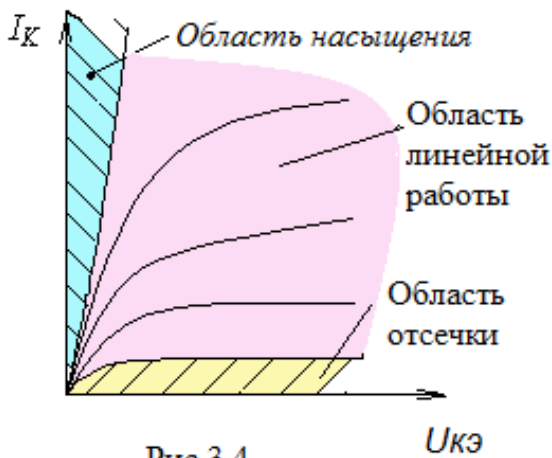


Рис 3.4

В области отсечки и насыщения нет прямо пропорциональной зависимости между входным и выходным током, эта зависимость наблюдается только в области линейной работы, где $\Delta I_K = \beta \Delta I_B$. (таблица 1).

Таблица 3.1

| Область работы | Состояние <i>p-n</i> - переходов | |
|----------------|----------------------------------|------------------|
| | эмиттер – база | база – коллектор |
| Насыщения | открыт | открыт |
| Отсечки | закрит | закрит |
| Линейная | открыт | закрит |

Предельно - допустимые параметры транзистора. Для нормальной работы транзистора необходимо укладываться в область, ограниченную предельно допустимыми параметрами : $U_{KЭ}$

max ; $I_K max$; $P_K max$:

– если $U_K > U_K max$, возможен пробой коллекторного *p-n* перехода;

– если $I_K > I_K max$, возможен перегрев эмиттерного *p-n* перехода;

– если $P_K > P_K max$ работа транзистора невозможна из-за перегрева коллекторного *p-n* перехода. Область работы транзистора ограничивают все три условия (рис. 3.5).

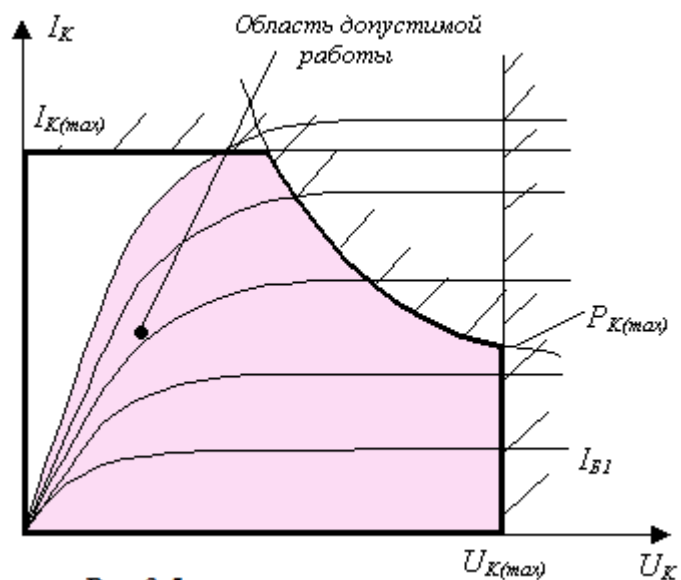


Рис 3.5

3.2 Полевые транзисторы

Полевые транзисторы (ПТ) – это полупроводниковые приборы с каналом, ток в котором управляется электрическим полем. Принцип действия их основан на протекании носителей заряда только одного знака через проводящий канал.

Главным достоинством полевых транзисторов является высокое входное сопротивление, т.е. они практически не потребляют ток из входной цепи. Кроме того, они более технологичны и дешевле, чем биполярные, обладают высокой воспроизводимостью требуемых параметров.

Полевые транзисторы подразделяют на два основных типа:

- Полевые транзисторы с управляющим $n - p$ -переходом;
- Полевые транзисторы МДП – типа
 - со встроенным каналом;
 - с индуцированным каналом

Полевые транзисторы с управляющим $n - p$ -переходом

Это ПТ у которого затвор отделён от канала закрытым $n - p$ -переходом. Канал – это центральный слой (может быть p -типа либо n -типа), заключенный между двумя $n - p$ -переходами (рис. 3.6, а). Канал имеет два вывода во внешнюю цепь: исток (И), из которого заряды выходят в канал, сток (С), в который заряды входят из канала. Слои p -типа (внешние) соединены между собой и имеют вывод во внешнюю цепь, называемый затвором (З). Затвор служит для регулирования поперечного сечения канала. Особенность ПТ в том, что движение основных носителей заряда только одного знака происходит по каналу от истока к стоку, а не через переход, как в биполярном транзисторе.

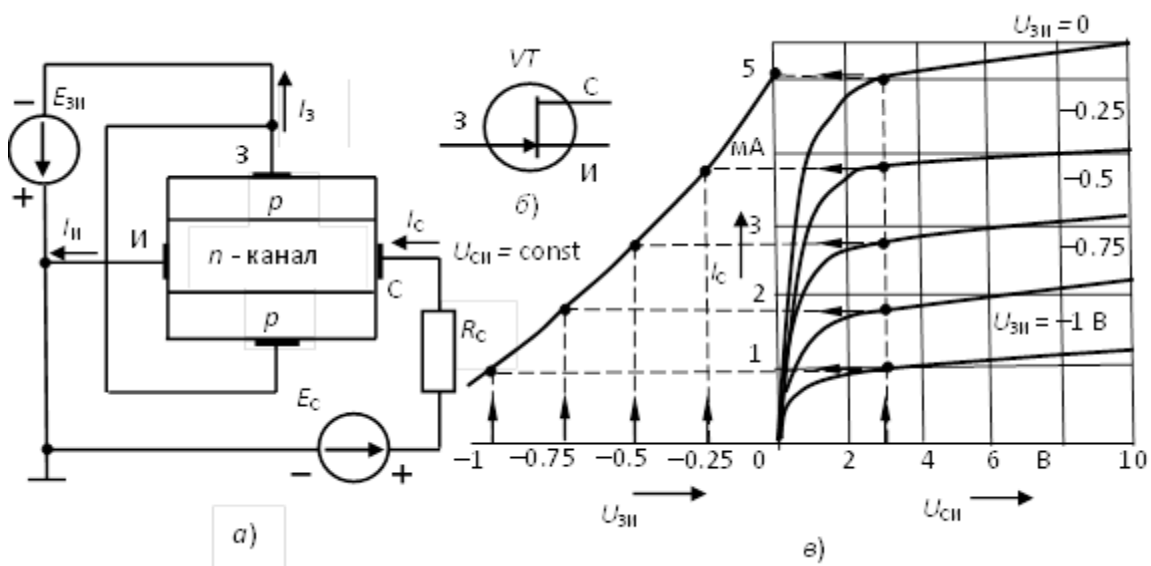


Рисунок 3.6 Полевой транзистор с управляющим $p-n$ переходом

Управляющее напряжение между затвором и истоком является обратным для обоих $n - p$ -переходов ($U_{зи} < 0$). Оно создает вдоль канала равномерный слой, обедненный носителями заряда при $U_{си} = 0$. Изменяя $U_{зи}$, изменяют ширину $n - p$ -переходов, тем самым регулируют сечение токопроводящего

канала и его проводимость. Напряжение $U_{си} > 0$ вызывает неравномерность обедненного зарядами слоя, наименьшее сечение канала вблизи стока.

Управляющее действие затвора иллюстрируют передаточной (стоко-затворной) характеристикой $I_c(U_{зи})$ при $U_{си} = \text{const}$. На практике чаще используют выходные (стоковые) характеристики $I_c(U_{си})$ при $U_{зи} = \text{const}$, по которым строят передаточные (рис. 3.6, в).

Полевые транзисторы с управляющим $n-p$ -переходом работают в режиме обеднения канала, при увеличении управляющего напряжения $U_{зи}$ поперечное сечение проводящего канала и его проводимость уменьшаются, что вызывает снижение тока канала I_c .

Полевые транзисторы МДП – типа со встроенным каналом

МДП – транзисторы со встроенным каналом имеют структуру металл(М) – диэлектрик(Д) – полупроводник(П), их так же называют полевыми транзисторами с изолированным затвором, т. к. у них затвор отделен от канала диэлектриком. У поверхности кристалла полупроводника (подложки p -типа) созданы две области n -типа и тонкая перемычка между ними – канал (рис. 3.7, а). Области n -типа имеют выводы: И – исток и С – сток. Кристалл покрыт окисной пленкой диэлектрика SiO_2 , на которой расположен металлический затвор (З), электрически изолированный от цепи исток – сток. Подложка соединяется с истоком внутри прибора, либо имеет вывод во внешнюю цепь (П).

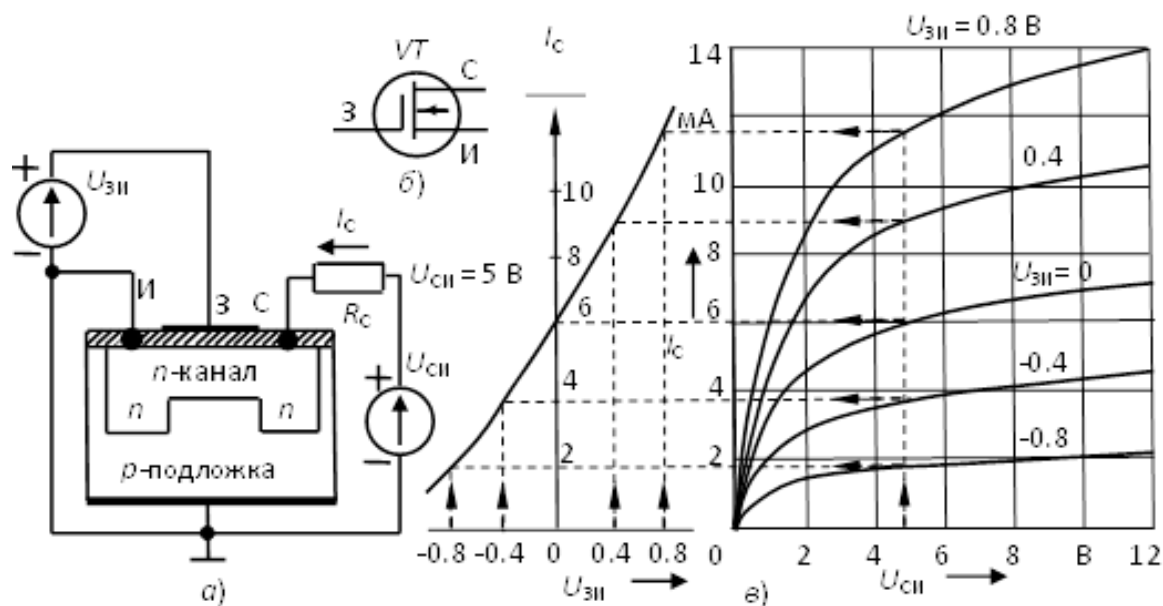


Рисунок 3.7 Полевой МДП транзистор со встроенным каналом

При отрицательном потенциале на затворе $U_{зи} < 0$ поле затвора выталкивает электроны из канала в p -подложку, исток и сток. Канал обедняется электронами, его сопротивление увеличивается, и ток стока уменьшается. Такой режим называют режимом обеднения. Характеристики $I_c(U_{си})$ располагаются ниже кривой при $U_{зи} = 0$ (рис. 3.7, в). Если на затвор подано

$U_{зи} > 0$, то под действием поля затвора канал насыщается электронами из p -подложки, истока и стока - это режим обогащения.

Таким образом, МДП-транзистор со встроенным каналом может работать как в режиме обеднения, так и в режиме обогащения, что наглядно показывают его характеристики. Структура, условное графическое изображение, передаточная $I_C (U_{зи})$ при $U_{си} = \text{const}$ и стоковые $I_C (U_{си})$ при $U_{зи} = \text{const}$ характеристики ПТ со встроенным каналом даны на рис. 3.7, а, б, в.

Полевые транзисторы МДП – типа с индуцированным каналом

МДП-транзисторы с индуцированным каналом не имеют специально созданного канала между истоком и стоком, и при $U_{зи} = 0$ выходной ток $I_C = 0$. Канал индуцируется при положительном потенциале на затворе $U_{зи} > 0$ благодаря притоку электронов из p -подложки.

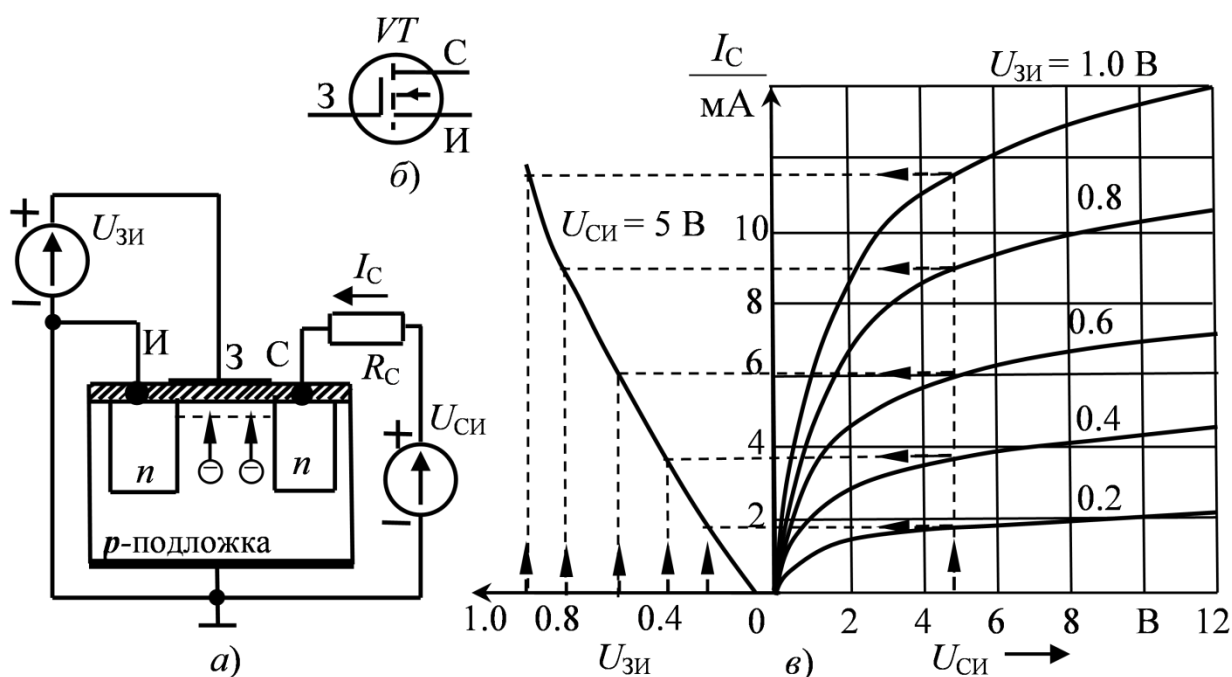


Рисунок 3.8 Полевой МДП транзистор с индуцированным каналом

Напряжение затвора, при котором создается канал, называют пороговым $U_{пор}$, при дальнейшем увеличении управляющего напряжения относительно порогового происходит увеличение поперечного сечения канала. Этот прибор работает только в режиме обогащения.

Основными параметрами полевых транзисторов являются:

Крутизна передаточной характеристики

$$S = \Delta I_C / \Delta U_{зи} \text{ при } U_{си} = \text{const}$$

$$S = 0,1 \dots 500 \text{ mA/V ;}$$

Внутреннее (выходное) сопротивление

$$R_i = \Delta U_{си} / \Delta I_C \text{ при } U_{зи} = \text{const.}$$

$$R_i = 0,1 \dots 1 \text{ МОм}$$

Коэффициентом усиления

$$\mu = \Delta U_{\text{си}} / \Delta U_{\text{зи}} \text{ при } I_{\text{с}} = \text{const};$$

$$\mu = S R i.$$

Начальный ток стока $I_{\text{с нач}}$ при $U_{\text{зи}} = 0$:

у транзисторов с управляющим n - p -переходом $I_{\text{си нач}} = 0,2 \dots 600 \text{ мА}$;

со встроенным каналом $I_{\text{си нач}} = 0,1 \dots 100 \text{ мА}$;

с индуцированным каналом $I_{\text{с нач}} = 0,01 \dots 0,5 \text{ мкА}$.

Напряжение отсечки $U_{\text{зиотс}} = 0,2 \dots 10 \text{ В}$.

Пороговое напряжение $U_{\text{зипор}} = 1 \dots 6 \text{ В}$.

Предельно допустимые параметры $U_{\text{зи max}}$ В, P_{max} мВт

3.3 Биполярные транзисторы с изолированным затвором (БТИЗ)

БТИЗ являются новым типом активного прибора, который появился сравнительно недавно. Его входные характеристики подобны входным характеристикам полевого транзистора, а выходные – выходным характеристикам биполярного. В иностранной литературе этот прибор называют *IGBT* (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). По быстродействию он значительно превосходит биполярные транзисторы. Чаще всего *IGBT*-транзисторы используют в качестве мощных ключей, у которых время включения $0,2 \dots 0,4 \text{ мкс}$, а время выключения $0,2 \dots 1,5 \text{ мкс}$, коммутируемые напряжения достигают $3,5 \text{ кВ}$, а токи 1200 А .

Схематичный разрез структуры *IGBT* показан на рис. 3.9 а. Биполярный транзистор образован слоями p^+ (эмиттер), n (база), p (коллектор); полевой - слоями n (исток), n^+ (сток) и металлической пластиной (затвор). Слои p^+ и p имеют внешние выводы, включаемые в силовую цепь. Затвор имеет вывод, включаемый в цепь управления. На рис. 3.9, б изображена структура *IGBT* IV поколения, выполненного по технологии "утопленного" канала (*trench - gate technology*), позволяющей исключить сопротивление между p -базами и уменьшить размеры прибора в несколько раз.

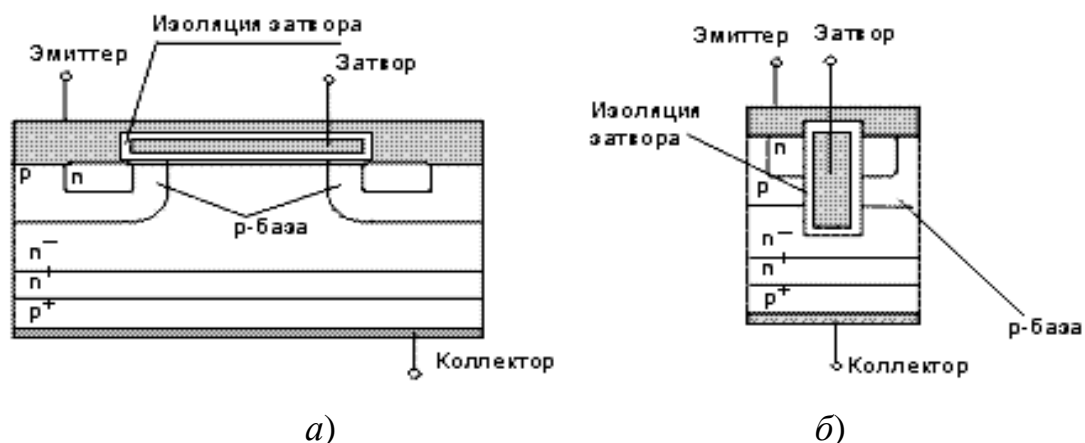


Рисунок 3.9 Биполярный транзистор с изолированным затвором

Процесс включения *IGBT* можно разделить на два этапа: при подаче положительного напряжения на затвор электрическое поле оттолкнёт дырки,

находящиеся близко к поверхности затвора вглубь подложки, а электроны притянет, при достижении *порогового напряжения*, происходит открытие полевого транзистора (формируется n - канал между истоком и стоком). Движение зарядов из области n в область p приводит к открытию биполярного транзистора и возникновению тока от эмиттера к коллектору. Таким образом, полевой транзистор управляет работой биполярного.

IGBT обладает следующими достоинствами по сравнению с БТ:

- *IGBT* управляется не током, а напряжением. Управление напряжением снижает мощность, необходимую для переключения транзистора из одного состояния в другое.
- Скорость выключения *IGBT* выше, чем у БТ.
- Параметры *IGBT* меньше зависят от температуры, чем параметры БТ.
- Благодаря использованию многоячеистых интегральных схем в *IGBT* удаётся значительно снизить пороговое напряжение для преодоления потенциального барьера p - n перехода и переключения транзистора в рабочий режим.

3.4 Транзистор со статической индукцией (*SIT*)

SIT (*Static Induction Transistor*) – полевой транзистор с управляющим p - n -переходом со статической индукцией. Является многоканальным и имеет вертикальную структуру. Схематическое изображение *SIT* и схема включения с общим истоком показаны на рис. 3.10.

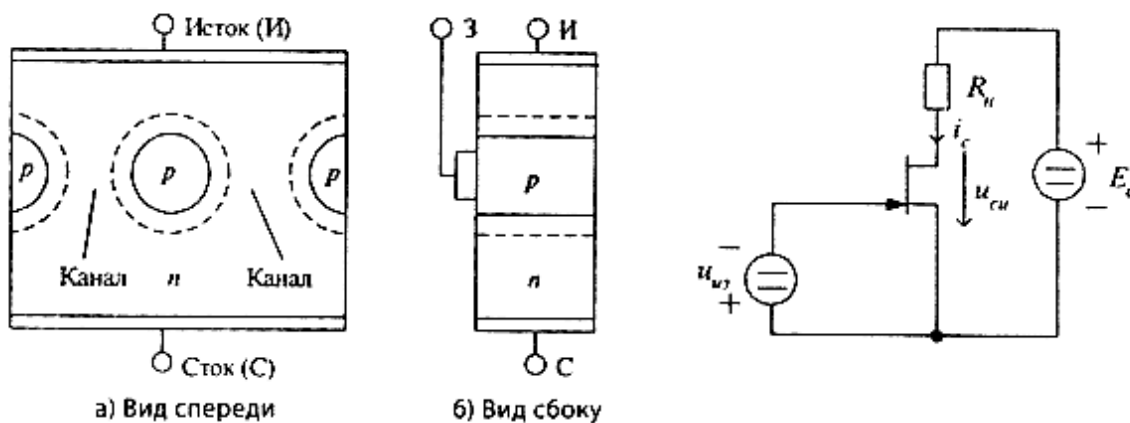


Рисунок 3.10 Транзистор со статической индукцией

Области полупроводника p - типа имеют форму цилиндров, диаметр которых составляет единицы микрометров и более. Эта система цилиндров играет роль затвора. Каждый цилиндр подсоединен к электроду затвора (на рис. 3.10, а электрод затвора не показан). Пунктиром обозначены области p - n -переходов. Реальное число каналов может составлять тысячи.

Обычно *SIT* используется в схемах с общим истоком, производят с каналом n и p – типа. *SIT* – транзисторы широко применяют в усилителях мощности звуковых частот, а также в устройствах силовой электроники в ключевом режиме работы.

ТЕМА 4. ТИРИСТОРЫ

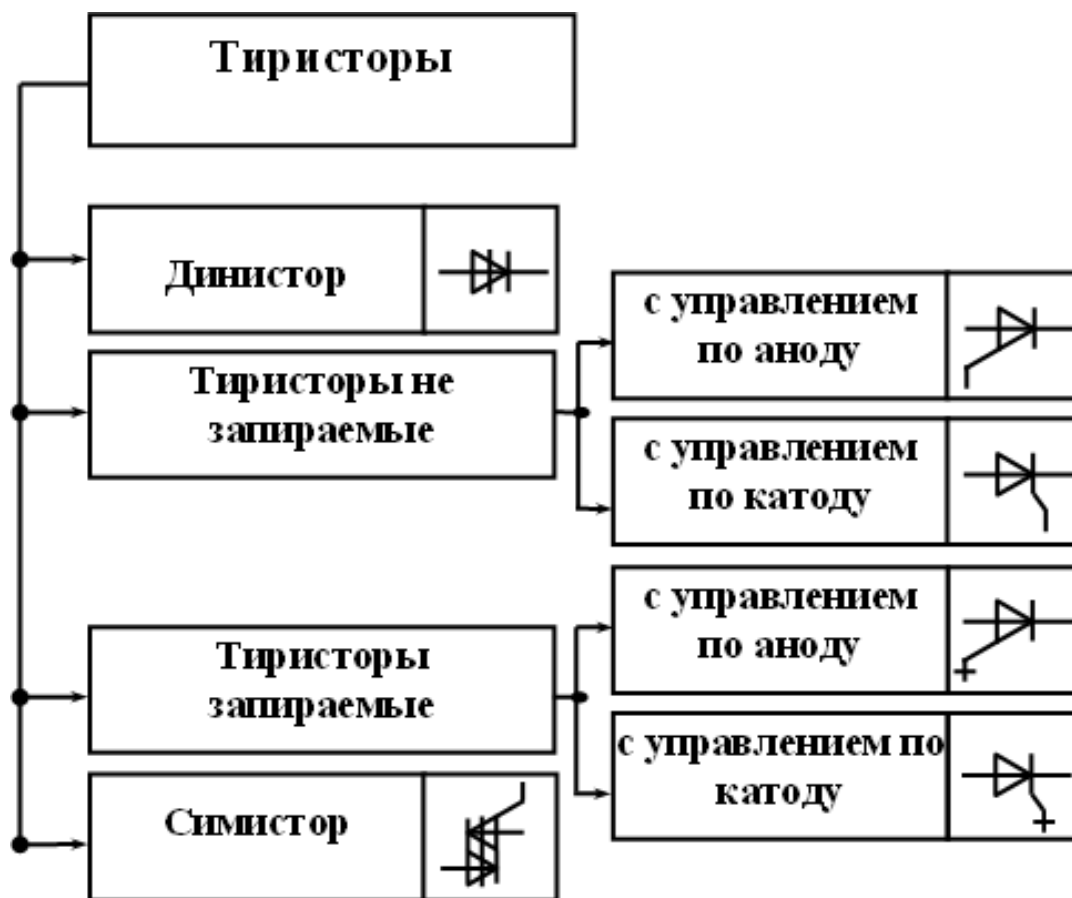


Рисунок 4.1 Классификация и система обозначений полупроводниковых тиристоров

Тиристором называют полупроводниковый прибор с тремя или более n - p -переходами. Он может находиться в одном из двух устойчивых состояний: низкой проводимости (закрыт) или высокой проводимости (открыт). Различают диодные (неуправляемые) и триодные (управляемые) тиристоры. Диодный тиристор называют динистором, а триодный – тринистором. Структура, условное графическое и буквенное обозначения тиристора, его вольтамперная характеристика даны на рис. 4.2, а, б, в.

Основу прибора составляет кристалл кремния, в котором созданы четыре слоя с разными типами электропроводности. Внешний p -слой называют **анодом** (А), внешний n -слой – **катодом** (К), а два внутренних слоя – базами. Одна из баз имеет вывод – управляющий электрод (У).

При прямом включении (анод положителен по отношению к катоду) переходы П1 и П3 смещены в прямом направлении, а переход П2 – в обратном направлении. До тех пор, пока П2 закрыт, прямой ток практически равен нулю (участок oa характеристики рис. 4.2, в). При некотором значении прямого напряжения, равном $U_{\text{вкл. max}}$, за счет перераспределения зарядов в области баз

переход П2 открывается (точка *a*). Сопротивление его быстро уменьшается (участок *ab*), и тиристор работает на участке *бв* характеристики, которая подобна ВАХ диода.

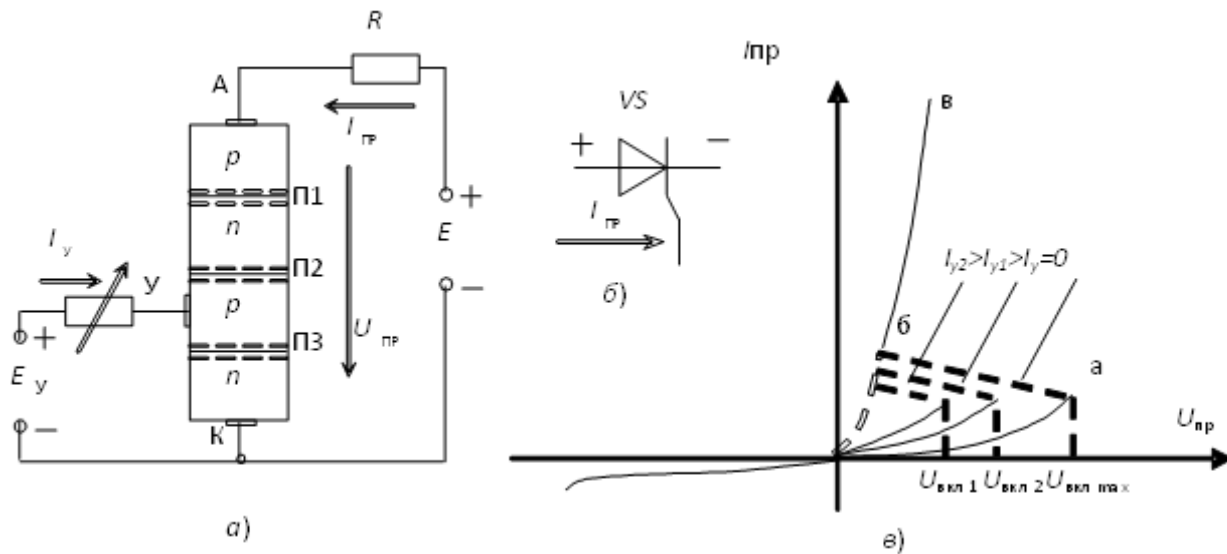


Рисунок 4.2 Тиристор

Напряжение включения $U_{\text{вкл.}}$ можно уменьшить введением добавочных носителей заряда в любой из слоев, прилегающих к переходу П2. Добавочные носители заряда I_y на рис. 4.4, *a* вводятся в слой *p* от вспомогательной управляющей цепи с независимым источником E_y . При увеличении тока управления I_y характеристика включения (рис. 4.2, *в*) смещается влево (к естественной прямой ветви ВАХ диода). Тиристор остается во включенном состоянии, пока протекающий через него ток больше критического, называемого током удержания $I_{\text{уд}}$. Как только $I_{\text{пр}}$ станет меньше $I_{\text{уд}}$, тиристор закрывается.

Следует отметить, что после включения тиристора объемные заряды в области перехода П2 будут компенсированы основным током, если он больше тока $I_{\text{уд}}$, и тогда ток управления I_y не нужен. Поэтому для снижения потерь в тиристоре он управляется короткими импульсами I_y .

При обратном включении тиристора (анод отрицателен по отношению к катоду) закрыты два перехода П1 и П3, и тиристор тока не проводит. Во избежание пробоя необходимо, чтобы обратное напряжение было меньше $U_{\text{обр. max}}$.

Основные параметры, используемые при выборе тиристорov: предельно допустимый анодный ток в открытом состоянии тиристора $I_{\text{пр. max}}$, предельно допустимое обратное напряжение $U_{\text{обр. max}}$, предельно допустимое прямое напряжение в закрытом состоянии тиристора $U_{\text{пр. max}}$, ток удержания $I_{\text{уд}}$, прямое напряжение в точке включения диодного тиристора $U_{\text{вкл.}}$.

Маломощные тиристоры применяют в релейных схемах и маломощных коммутирующих устройствах. Мощные тиристоры используют в управляемых выпрямителях, инверторах и различных преобразователях.

Запираемые тиристоры – имеют четырехслойную $p-n-p-n$ структуру, но в тоже время обладают рядом существенных конструктивных особенностей, придающих им принципиально отличное от традиционных тиристоров – свойство полной управляемости. Для выключения запираемого тиристора необходимо подать в цепь управляющего электрода мощный импульс отрицательного тока (примерно 1:5 по отношению к значению прямого выключаемого тока), но короткой длительности (10...100 мкс).

Запираемые тиристоры также имеют более низкие значения предельных напряжений и токов (примерно на 20...30 %) по сравнению с обычными тиристорами.

Симистор

Симистор – тиристор, имеющий пятислойную структуру, что определяет симметричность его вольтамперной характеристики в I и III квадрантах (рис. 2.3, в). Это полупроводниковый прибор, который широко используется в системах, питающихся переменным напряжением. Упрощенно он может рассматриваться как управляемый выключатель.

Симистор можно представить двумя тиристорами, включенными встречно – параллельно. Он пропускает ток в обоих направлениях. Структура этого полупроводникового прибора показана на рис. 4.3, а. Симистор имеет три электрода: один управляющий и два основных для пропускания рабочего тока.

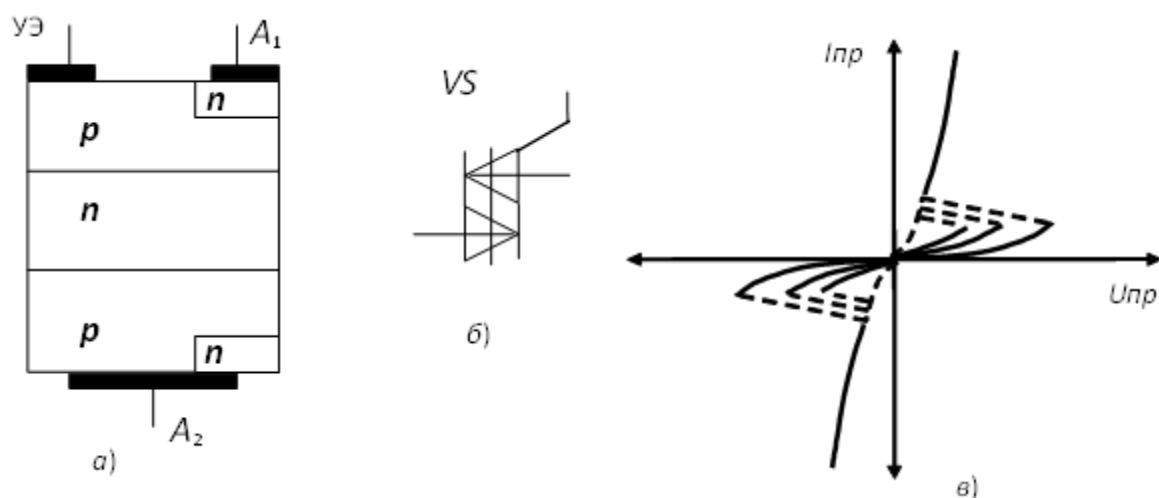


Рисунок 4.3 Симистор структура (а), обозначение (б), ВАХ (в)

Симистор открывается, если на управляющий электрод УЭ подается отпирающий ток или если напряжение между его электродами A₁ и A₂ превышает некоторую максимальную величину $U_{вкл}$. Отпирающий ток должен сохраняться до тех пор, пока рабочий ток I_H не превысит в два - три раза величину удерживающего тока I_y . Этот минимальный отпирающий ток и является током включения симистора.

Симистор переходит в закрытое состояние после изменения полярности между его выводами A₁ и A₂ если значение рабочего тока меньше тока удержания I_y .

Фототиристоры

Фототиристоры имеют четырехслойную структуру (рис. 4.4, а) и управляются световым потоком, подобно тому, как триодные тиристоры управляются током, подаваемым в цепь управляющего электрода. При действии света на область базы $p1$ в этой области генерируются электроны и дырки.

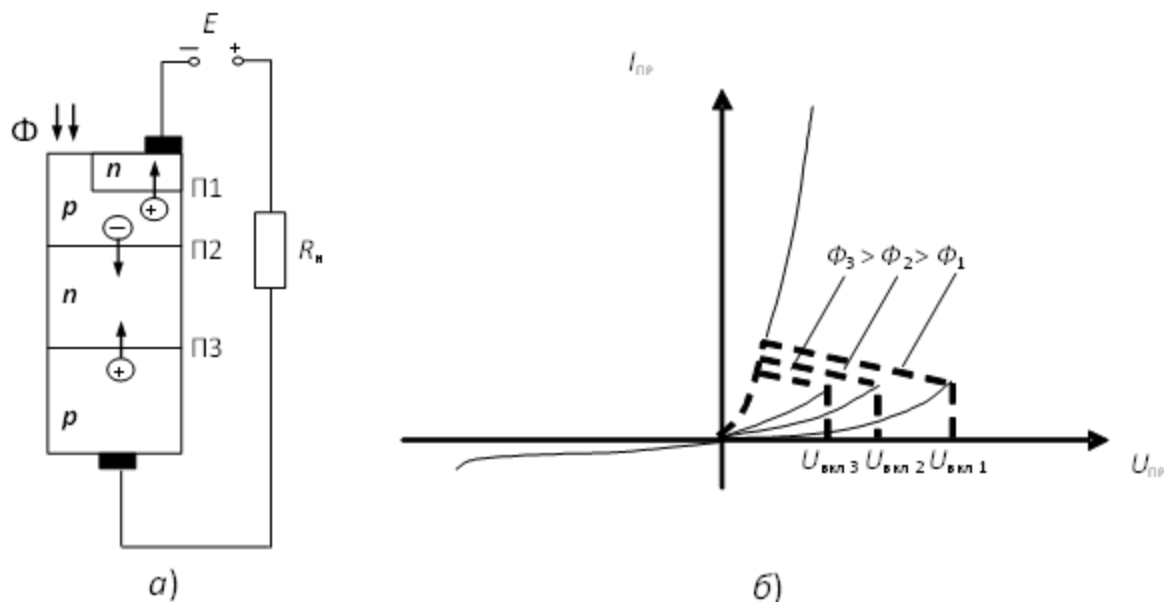


Рисунок 4.4 Фототиристор структура (а), ВАХ (б)

Электроны, попадая в область перехода П2, находящегося под обратным напряжением, уменьшают его сопротивление. В результате происходит увеличение инжекции носителей из переходов П1 и П3. Ток через структуру прибора лавинообразно нарастает, т.е. тиристор отпирается. Чем больше световой поток, действующий на тиристор, тем при меньшем напряжении включается тиристор (рис. 4.4, б).

Фототиристоры могут успешно применяться в различных автоматических устройствах в качестве бесконтактных ключей для включения значительных напряжений и мощностей. Важные достоинства тиристоров: малое потребление мощности во включенном состоянии, малые габариты, отсутствие искрения, малое время включения.

Основные параметры тиристоров

1. Напряжение переключения: постоянное — $U_{прк}$, импульсное — $U_{прк}$ и (десятки — сотни вольт).
2. Напряжение в открытом состоянии U_{oc} — падение напряжения на тиристоре в открытом состоянии ($U_{oc} = 1 \dots 3$ В).
3. Обратное напряжение $U_{обр}$ — напряжение, при котором тиристор может работать длительное время без нарушения его работоспособности (единицы — тысячи вольт).

4. Постоянное прямое напряжение в закрытом состоянии $U_{зс}$ – максимальное значение прямого напряжения, при котором не происходит включение тиристора (единицы – сотни вольт).

5. Неотпирающее напряжение на управляющем электроде $U_{у,нот}$ – наибольшее напряжение, не вызывающее отпирание тиристора (доли вольт).

6. Запирающее напряжение на управляющем электроде $U_{уз}$ – напряжение, обеспечивающее требуемое значение запирающего тока управляющего электрода (единицы – десятки вольт).

7. Ток в открытом состоянии $I_{откр\ max}$ – предельное значение тока открытого тиристора (сотни миллиампер – сотни ампер).

8. Обратный ток $I_{обр}$ (доли миллиампер).

9. Отпирающий ток $I_{у\ от}$ – наименьший ток управляющего электрода, необходимый для включения тиристора (десятки миллиампер).

10. Ток удержания $I_{уд}$ – минимальный прямой ток, проходящий через тиристор при разомкнутой цепи управления, при котором тиристор еще находится в открытом состоянии.

11. Время включения $t_{вкл}$ – это время от момента подачи управляющего импульса до момента снижения напряжения на тиристоре до 10 % от начального значения при работе на активную нагрузку (единицы – десятки микросекунд).

12. Время выключения $t_{выкл}$, называемое также временем восстановления управляющей способности тиристора. Это время от момента, когда прямой ток тиристора становится равным нулю, до момента, когда прибор снова будет способен выдерживать прямое напряжение между анодом и катодом. Это время в основном определяется временем рассасывания неосновных носителей в зонах полупроводника (десятки – сотни микросекунд).

ТЕМА 5. ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

5.1 Полупроводниковые резисторы

Полупроводниковыми резисторами называют полупроводниковые приборы, принцип действия которых основан на свойствах полупроводников изменять свое сопротивление под действием температуры, электромагнитного излучения, приложенного напряжения и других факторов.

Терморезистор – полупроводниковый прибор, сопротивление которого изменяется при изменении температуры (у **термистора** сопротивление уменьшается с ростом температуры, а у **позистора** - возрастает).

Температурная характеристика термистора показана на рисунке 5.3.

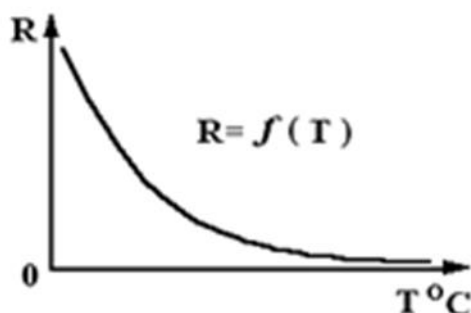


Рисунок 5.3. Температурная характеристика термистора

Параметры терморезистора:

- 1) холодное сопротивление (при $t = 20^{\circ}\text{C}$);
- 2) температурный коэффициент сопротивления (ТКР) %;
- 3) рабочая температура (t°_{max});
- 4) максимальная рассеиваемая мощность $P_{\text{max}} \text{ расс.}$

Применяют термисторы для измерения и регулирования температуры, а также термокомпенсации.

Позисторы – полупроводниковые терморезисторы с положительным температурным коэффициентом (титанат бария с примесями), у которых сопротивление увеличивается при увеличении $t^{\circ}\text{C}$. Основная характеристика – температурная (рисунок 5.4). Параметры аналогичны параметрам термистора.

Применяют позисторы для автоматического регулирования температуры, термокомпенсации, в схемах ограничителей и стабилизаторов тока, для предохранительных приборов и устройств защиты от перегрева, в качестве бесконтактных переключающих элементов.

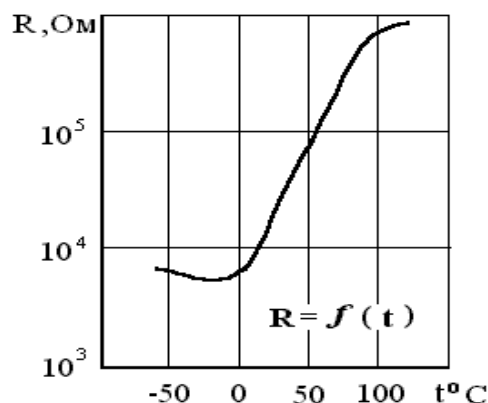


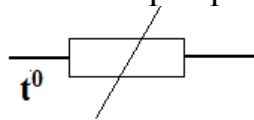
Рисунок 5.4 Температурная характеристика позистора

Маркировка терморезисторов состоит из трех элементов:

- первый элемент маркировки обозначает назначение (СТ – резисторы термочувствительные, Т и ТШ – резисторы измерительные, ТП – стабилизирующие, ТКП – регулируемые бесконтактные);
- второй элемент обозначает тип полупроводника (1 – кобальт-марганец, 2 – медно-марганцевые, 3 – медно-кобальт-марганцевые, 4 – кобальт-никель-марганец);
- третий элемент обозначает номер конструкции.

Примеры: СТ2 – 26, СТ4 – 5, ММТ – 6, ТШ – 2, ТКП – 450.

Условное графическое изображение терморезисторов:



Варисторы – полупроводниковые резисторы (на основе карбида Si) сопротивление которых зависит от приложенного напряжения.

Основная характеристика варистора – это вольтамперная характеристика (ВАХ) $I = f(U)$ (рис. 5.5).

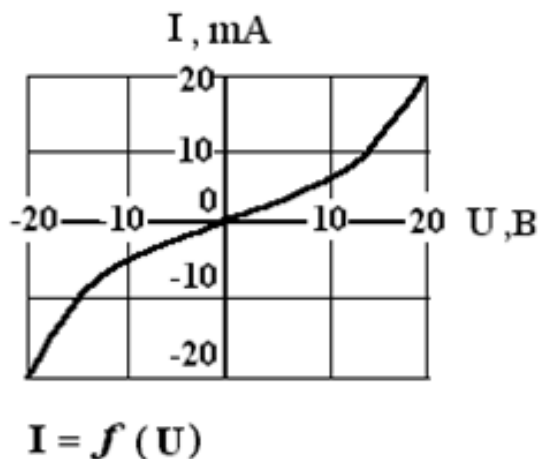


Рисунок 5.5. ВАХ варистора

Параметры варистора:

- 1) статическое сопротивление при постоянных значениях тока и напряжения $R_{ст} = U/I$;
- 2) динамическое сопротивление переменному току $R_{д} = \Delta U / \Delta I$;
- 3) коэффициент нелинейности $\beta = R_{ст} / R_{д}$;
- 4) максимальная рассеиваемая мощность P_{\max} расс.

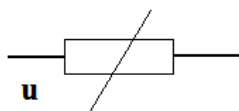
Применяют варисторы для регулирования электрических величин, стабилизации токов и напряжений, для защиты элементов от перенапряжений.

Маркировка прибора состоит из 4 элементов:

- первый элемент обозначает назначение (СН - сопротивление нелинейное);
- второй элемент обозначает тип полупроводника;
- третий элемент обозначает тип конструктивного выполнения;
- четвертый элемент обозначает длину токоведущего элемента.

Примеры: СН1 -1, СН -3.

Условное графическое изображение варистора:

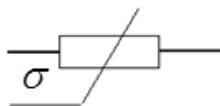


Тензорезисторы - полупроводниковые резисторы, сопротивление которых зависит от величины механической деформации.

Для характеристики изменения сопротивления при деформации используется коэффициент тензочувствительности **m**, который представляет собой отношение относительного изменения сопротивления к относительной деформации в данном направлении:

$$m = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l} = \frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l}$$

Условное графическое изображение тензорезистора:



Фоторезисторы — полупроводниковые приборы, электрическое сопротивление которых изменяется под действием светового потока.

Основой фоторезистора является светочувствительный элемент — прямоугольная или круглая таблетка, спрессованная из полупроводникового материала или тонкая пленка на стеклянной подложке с электродами с малым переходным сопротивлением (рис. 5.6).

Принцип действия фоторезистора основан на использовании явления внутреннего фотоэффекта: при увеличении светового потока часть электронов

проводимости сталкивается с атомами, ионизирует их и создает дополнительный поток электронов (возникает фототок проводимости).

При отсутствии тока через фоторезистор течет темновой ток:

$$I_T = \frac{E}{R_T + R_H},$$

где R_T - темновое сопротивление фоторезистора.

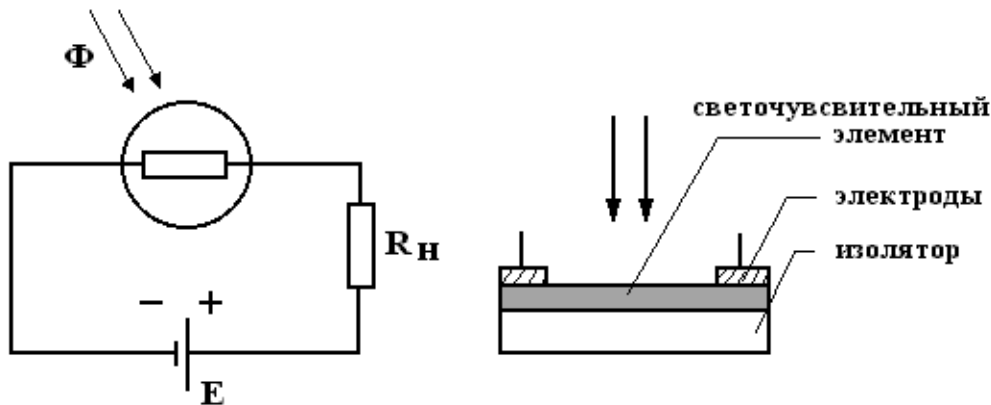


Рисунок 5.6. Конструкция фоторезистора

При освещении фоторезистора через него протекает световой ток:

$$I_C = \frac{E}{R_C + R_H}.$$

Основные характеристики фоторезистора (рис. 5.7):

1) вольтамперная характеристика – зависимость фототока (или темнового тока) от приложенного напряжения при постоянном световом потоке:

$I_\Phi = f(U_\Phi)$ при $\Phi = \text{const}$ (рис. 5.7, а);

2) световая(энергетическая) – зависимость фототока от падающего светового потока постоянного спектрального состава $I_\Phi = f(\Phi)$ при $U = \text{const}$ (рисунок 5.7, б);

3) спектральная – зависимость чувствительности фоторезистора от длины волны светового излучения (рис. 5.7, в).

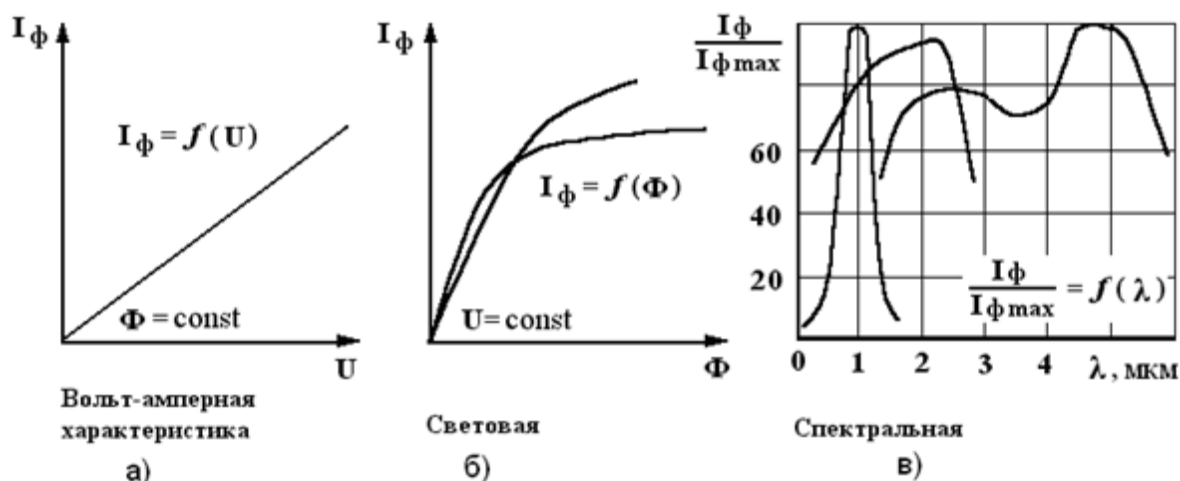


Рисунок 5.7 Характеристики фоторезистора

Основные параметры фоторезистора:

- 1) темновое сопротивление R_T ;
- 2) темновой и фото- токи (I_T, I_ϕ);
- 3) удельная чувствительность $S = \frac{I_\phi}{\Phi \cdot U}$;
- 4) рабочее напряжение;
- 5) максимальная рассеиваемая мощность $P_{\max \text{ расс.}}$.

Маркировка фоторезистора состоит из трех элементов:

- первый элемент обозначает назначение (ФС - фотосопротивление);
- второй элемент обозначает тип полупроводника (К-кремний);
- третий элемент обозначает тип конструктивного выполнения;

Примеры: ФСК -1, ФСК – 2, ФСА – 6.

Применение фоторезисторов: в промышленной электронике, телевидении, фототелеграфии, сигнализации и связи (в диапазоне инфракрасных волн), а также в схемах электронной автоматики.

5.2. ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

Независимо от функционального назначения все электровакуумные приборы можно разделить на две группы: электронные и газоразрядные (ионные).

Принцип действия вакуумных электронных приборов (ламп) основан на движении электронов в вакууме под действием электрического поля. Эти приборы служат базой для изучения большинства видов радиоэлектронной аппаратуры. В современной аппаратуре электровакуумные приборы заменяются полупроводниковыми, однако имеются области, где электровакуумные приборы или превосходят полупроводниковые или являются незаменимыми.

С помощью электровакуумных приборов можно создать генераторы мегаваттной мощности ($\sim 10^6$ Вт), а с помощью одного полупроводникового прибора удастся получить примерно в 1000 раз меньшую мощность колебаний.

Электровакуумными приборами являются телевизионные передающие и приемные электронно-лучевые трубки. Кроме того, вся электронная аппаратура высшего класса выполняется на электронных лампах. Такого высокого качества звучания, как у усилителя на электронных лампах, невозможно достичь в усилителе, выполненном на полупроводниковых приборах и интегральных микросхемах.

Электронные приборы отличаются от второй группы приборов этого класса – ионных приборов тем, что все процессы происходят в них при очень высоком вакууме $1,33(10^{-4} \dots 10^{-5})$ Па и влияние газов на эти процессы ничтожно.

Существуют следующие группы электронных приборов:

1. **Электронные лампы** имеют накаливаемый катод и предназначены для преобразования электрического тока.

Их используют в генераторах переменного тока различной частоты, усилителях постоянного и переменного тока, усилителях мощности, выпрямителях переменного тока, стабилизаторах напряжения, преобразователях частоты, формирователях импульсов специальной формы и других устройствах.

2. **Электронно-лучевые приборы**. В этих приборах используется энергия потока электронов, сконцентрированного в узкий луч или пучок лучей. Их используют в телевидении (кинескопы, суперорбитроны), в измерительных приборах (осциллографы), дисплеях ЭВМ, радиолокаторах и индикаторах.

3. **Фотоэлектронные приборы** – преобразуют световые сигналы в электрические (фотоэлементы с [внешним фотоэффектом](#) и фотоэлектронные умножители).

Существуют и другие типы электронных приборов: электронно-оптические преобразователи, рентгеновские трубки.

Ионные (газоразрядные) приборы используют свойства электрического разряда в газах. Рабочий объем таких приборов после вакуумирования заполняется инертными газами, парами ртути, водородом до давления $0,133 \dots 1330$ Па. Носителями зарядов в газоразрядных приборах являются электроны и ионы, образующиеся в результате ударной ионизации атомов газа.

Электронные лампы

В лампе имеется несколько проводящих элементов, называемых электродами. Эмиссию электронов в лампе осуществляет катод. Эта эмиссия вызывается либо нагревом катода, в результате которого электроны «закипают» и испаряются с его поверхности, либо воздействием света на катод. Движением эмиттированных электронов управляют электрические поля, создаваемые другими электродами внутри лампы. В большинстве случаев электроды лампы изолированы друг от друга и посредством проволочных выводов соединены с внешними схемами. Электроды, которые служат для управления движением электронов, называются сетками; электроды, на которые электроны

собираются, называются анодами.

В электронной лампе относительно просто управлять величиной, продолжительностью, частотой и другими характеристиками электронного потока. Эти простота и легкость управления делают ее ценным прибором в многочисленных приложениях.

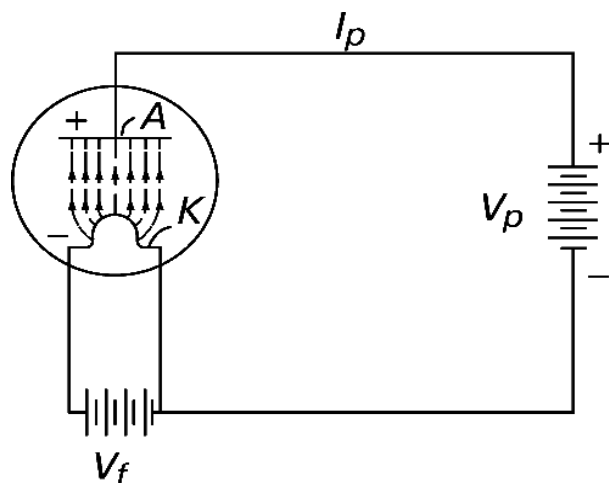


Рисунок 5.1 Диодная лампа

Диод – простейшая электронная лампа, в которой электроны, вышедшие из раскаленного катода, движутся в вакууме под действием положительного потенциала анода (рис. 5.1). Через лампу пройдет ток. При изменении полярности анода и катода электроны под действием электрического поля возвращаются назад на катод и ток через лампу протекать не будет. Свойство диода пропускать ток только в одном направлении называется односторонней проводимостью.

Величина анодного тока зависит от температуры разогрева катода и величины анодного напряжения U_A . при возрастании температуры катода возрастает количество электронов, достигших анода. При небольших значениях анодного напряжения U_A не все электроны попадут на анод. Температура разогрева катода зависит от величины напряжения накала.

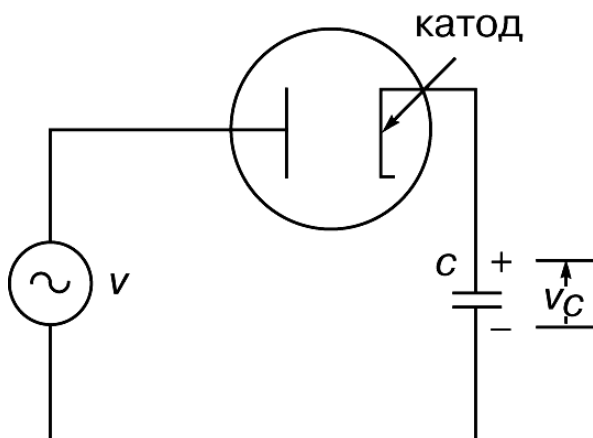


Рисунок 5.2

Применение диода

Простой иллюстрацией применения диода может служить схема,

приведенная на рис. 5.2, где диод используется для зарядки конденсатора напряжением от источника переменного тока. Когда потенциал катода ниже анодного потенциала, через диод течет ток, так что, в конце концов, конденсатор заряжается до пикового напряжения источника переменного тока. Варианты схемы рис. 5.2 используются для детектирования сигнала звуковой частоты из радиочастотной волны и для получения мощности постоянного тока от источников переменного тока.

Триод – это электронная лампа, в которой имеется третий (управляющий) электрод, установленный между катодом и анодом (рис. 5.3).

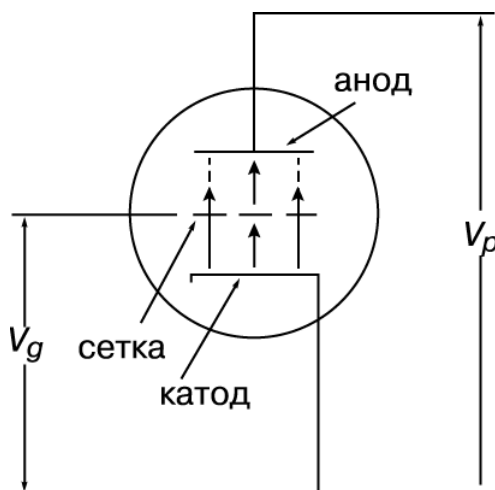


Рисунок 5.3 Триод

Этот электрод обычно представляет собой сетку из тонких проволок, установленную очень близко к катоду, чтобы при небольшой разности потенциалов между сеткой и катодом в области между этими двумя электродами действовало сравнительно высокое электрическое поле. При этом потенциал сетки будет оказывать сильное воздействие на электроны.

Многоэлектродные лампы

Лампа с двумя сетками (четырьмя электродами) называется **тетродом**. Обычно вторая сетка, которая называется экранной и поддерживается под положительным потенциалом, находится между управляющей сеткой и анодом. Ее роль состоит в том, чтобы экранировать управляющую сетку от анода, уменьшая, таким образом, емкость между ними, которая в ряде случаев может привести к нежелательным эффектам обратной связи. Если между экранной сеткой и анодом добавляют еще одну сетку – антидинатронную, в результате получается пятиэлектродная лампа, или **пентод**. В тетроде электроны, достигающие поверхности анода, при ударе об нее выбивают вторичные электроны. Некоторые из них могут двигаться в обратном направлении и собираться экранной сеткой, обычно имеющей потенциал, близкий к потенциалу анода. Такой процесс вызывает потери в общем потоке электронов, проходящих через анод (в анодном токе). Антидинатронная сетка, находящаяся между экранной сеткой и анодом, поддерживается под отрицательным

потенциалом по отношению к обоим соседним электродам, так что возвращающиеся электроны отталкиваются ею обратно к аноду. На рис. 5.4 показана типичная схема включения пентода.

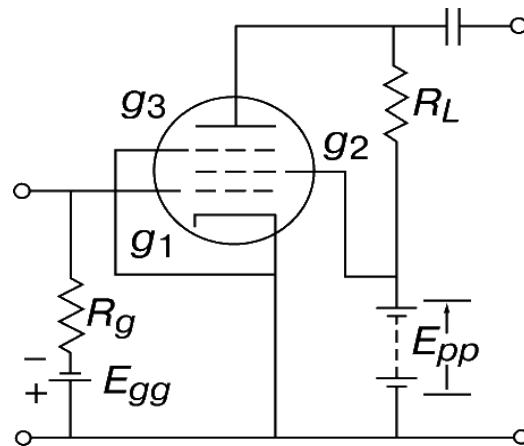


Рисунок 5.4 Пентод

В некоторых случаях для уменьшения габаритов две отдельные структуры электронных ламп объединяют в герметичном едином корпусе.

К электронно-лучевым приборам относятся ЭЛТ (электронно-лучевые трубки) индикаторных устройств радиолокаторов, осциллографов, кинескопы – это приемные телевизионные ЭЛТ, электронные микроскопы и некоторые другие приборы. ЭЛТ делятся на трубки с электростатическим и с магнитным управлением.

5.3. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

Интегральная микросхема (ИС) – микроэлектронное изделие, выполняющее определенную функцию обработки сигналов и имеющее высокую плотность размещения электрически соединенных элементов и компонентов.

Элемент ИС – часть ИС, выполняющая функцию транзистора, резистора или другого электрорадиоэлемента, изготовленного в едином технологическом цикле (при создании ИС) и не представляющая собой самостоятельного изделия.

Компонент ИС – представляет собой самостоятельное комплектующее изделие, которое устанавливается в ИС в процессе ее изготовления.

Все элементы ИС и их соединения выполнены в едином технологическом цикле на общей подложке.

Технологические процессы:

- наращивание полупроводникового материала на кремниевой подложке;
- термическое окисление кремния для получения слоя окисла SiO_2 , защищающего поверхность кристалла от внешней среды;
- фотолитография, обеспечивающая требуемые конфигурации пленок (SiO_2 , металл и т.п.) на поверхности подложки;

г) локальная диффузия – перенос примесных атомов в ограниченные области полупроводника (в настоящее время – ионная имплантация легирующего вещества);

д) напыление тонких (до 1 мкм) пленок;

е) нанесение толстых (более 1 мкм) пленок путем использования специальных паст с их последующим вжиганием.

ИС изготавливаются методами интегральной технологии, имеющей следующие отличительные особенности:

1. Элементы, однотипные по способу изготовления, представляют собой или полупроводниковые *p-n* структуры с несколькими областями, различающиеся концентрацией примесей или пленочные структуры из проводящих, резистивных и диэлектрических пленок.

2. Одновременно в едином технологическом цикле изготавливается большое количество одинаковых функциональных узлов, каждый из которых, в свою очередь, может содержать до сотен тысяч и более элементов.

3. Сокращается количество технологических операций (сборка, монтаж элементов) на несколько порядков по сравнению с традиционными методами производства аппаратуры на дискретных элементах.

4. Размеры элементов и соединений между ними уменьшаются до технологически возможных пределов.

5. Низконадежные соединения элементов, выполненные с помощью пайки, исключаются и заменяются высоконадежными соединениями (путем металлизации).

По технологии построения интегральные микросхемы подразделяют на:

- полупроводниковые;
- пленочные;
- гибридные;
- совмещенные.

В полупроводниковых ИС все элементы (диоды, транзисторы, резисторы и т. д.) и межсоединения выполнены на основе одного кристалла полупроводникового материала

В плёночных ИС все элементы представляют собой пленки, выполненных на поверхности диэлектрической подложки. Различают тонкопленочные и толстопленочные ИС.

В гибридных ИС пассивные элементы выполнены в виде пленок, а активные (диоды, транзисторы и т.д.) являются навесными

Последовательность основных этапов построения полупроводниковой ИС:

1. Выращивание кристалла кремния.
2. Разрезка на пластины (200...300мкм, Ø 40 – 150мм).
3. Очистка поверхности пластин.
4. Получение элементов и их соединений на пластине методом фотолитографии.
5. Разрезка пластин на отдельные части (кристаллы).
6. Закрепление в корпусе.

7. Подсоединение выводов с контактными площадками.

8. Герметизация корпуса.

Особенности ИС (на примере полупроводниковой):

- ИС самостоятельно выполняет законченную, часто весьма сложную, функцию;
- ИС может рассматриваться не только как элемент с определенными параметрами, но и как устройство с определенной электрической схемой;
- снимаются принципиальные ограничения по усложнению функций аппаратуры, которые были свойственны традиционному построению радиоэлектронных устройств на дискретных элементах;
- на одном и том же кристалле можно реализовать узел различной сложности.

Элементы ИС отличаются от аналогичных дискретных элементов:

- большой разброс параметров относительно расчетных (из-за малых размеров, невозможностью подгонки и подстройки);
- ограничение номинальных значений – сопротивлений и емкостей (из-за малой площади). Индуктивность вовсе не реализуется;
- однотипные элементы одной ИС характеризуется высокой идентичностью параметров и характеристик;
- наличие ряда паразитных параметров (токи утечки в подложку, появление емкостных и индуктивных связей между близкорасположенными элементами, соединениями и подложкой).

В ИС при создании функционального узла предпочтение отдается активным элементам перед пассивными. При построении аналогичных узлов на дискретных элементах, наоборот, стремятся уменьшить количество дорогих активных элементов (транзисторов и т.п.).

В ИС реализуются некоторые типы элементов, которые не имеют дискретных аналогов (многоэмиттерные транзисторы, элементы с инжекционным питанием, структуры с распределенными параметрами и др.).

Основные достоинства ИС:

- Высокая надежность.
- Малые размеры и масса.
- Экономичность.
- Быстродействие.

Модуль 2 Аналоговые устройства

Тема 6. НЕУПРАВЛЯЕМЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Выпрямителями называют электронные устройства для преобразования энергии переменного тока в энергию постоянного тока.

Классификация выпрямителей

Выпрямители классифицируются по нескольким признакам:

- 1) по возможности управления: неуправляемые; управляемые;
- 2) по числу фаз первичного источника питания: однофазные (выпрямители малой и средней мощности); многофазные, обычно 3-х фазные (выпрямители большой мощности);
- 3) по форме выпрямленного напряжения: однополупериодные; двухполупериодные.

Параметры выпрямителей

- 1) средние значения выпрямленного тока и напряжения $I_{н.ср.}$ и $U_{н.ср.}$;
- 2) мощность нагрузочного устройства $P_{н.ср} = U_{н.ср} \cdot I_{н.ср.}$;
- 3) амплитуда основной гармоники выпрямленного напряжения $U_{осн.т.}$;
- 4) коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения $p = U_{осн.т.}/U_{н.ср.}$;
- 5) КПД выпрямителя:

$$\eta = P_{н.ср.} / (P_{н.ср.} + P_{тр} + P_{\delta}),$$

где $P_{тр}$ – потери в трансформаторе;

P_{δ} – потери в диодах.

Рассмотрим структурную схему однофазного выпрямителя (рис. 6.1).

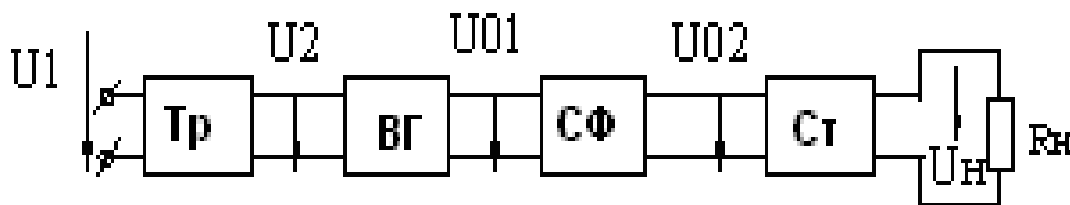


Рисунок 6.1. Структурная схема выпрямителя

В структурную схему входят следующие блоки: трансформатор Тр, вентильная группа ВГ, сглаживающий фильтр СФ, стабилизатор Ст. Трансформатор служит для согласования напряжения сети U_1 с требуемым напряжением нагрузки U_n и устранения электрической связи между цепью переменного и постоянного тока. Вентильная группа обеспечивает преобразования переменного тока в однонаправленный выпрямленный, в качестве вентилей применяют диоды, а в управляемых выпрямителях тиристоры. Сглаживающий фильтр – для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения. Стабилизатор поддерживает напряжение в нагрузке постоянным при колебаниях напряжения сети, либо при изменении режима работы. В зависимости от назначения выпрямителя часть блоков (Тр, СФ, СТ) могут отсутствовать

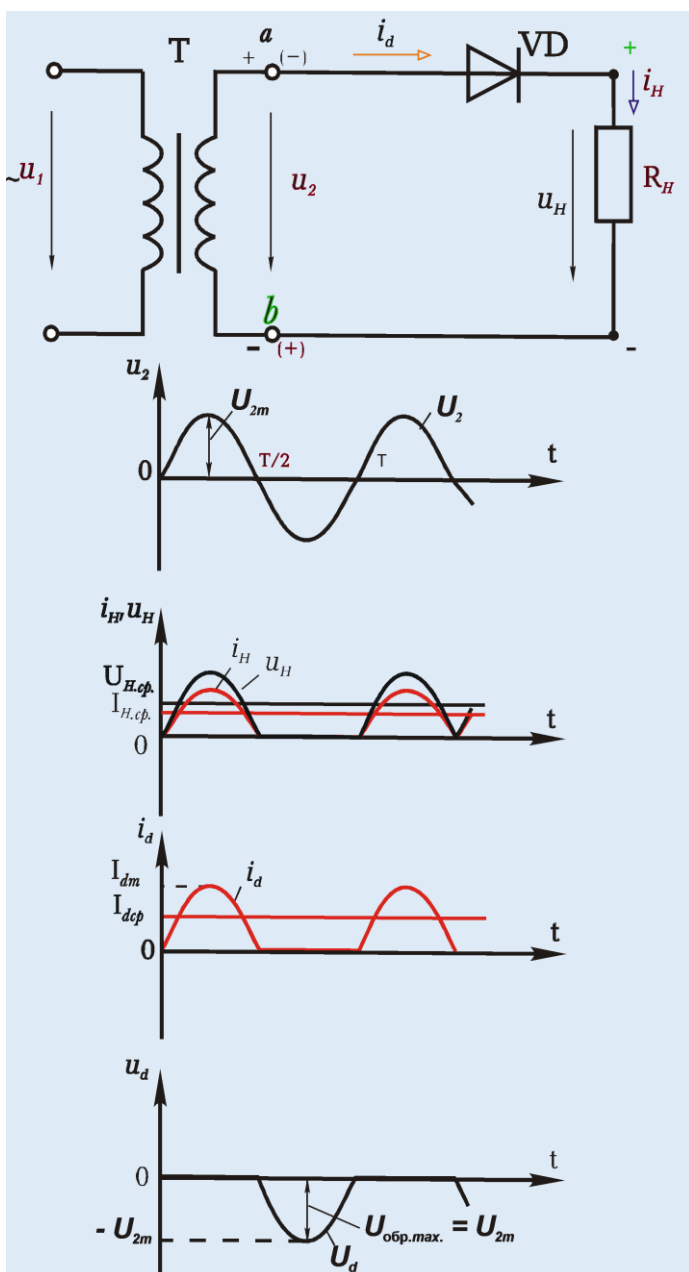
6.1 Однофазные выпрямители

Для выпрямления однофазного переменного напряжения применяют:

- 1) однополупериодный;
- 2) двухполупериодный мостовой;
- 3) двухполупериодный с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора.

Однополупериодный выпрямитель

Однополупериодный выпрямитель состоит из трансформатора T , к



вторичной обмотке которого последовательно подключены вентиль VD и нагрузочный резистор R_H . Работа выпрямителя показана с помощью временных диаграмм. В первый полупериод (интервал времени $0 - T/2$) вентиль будет открыт, т.к. потенциал точки, a выше потенциала точки b , и в цепи нагрузки возникает ток I_H . В интервале времени $T/2 - T$ вентиль закрыт, ток в нагрузке отсутствует, а к запертому вентилю прикладывается обратное напряжение. Нагрузка находится под напряжением только полпериода за каждый период, среднее напряжение $U_{H.c.p.}$ в 2.22 раза меньше U_2 . Данная схема имеет существенные недостатки: сильная пульсация выпрямленного напряжения, плохое использование трансформатора ($S_T = 3.5P_H$) и вентиля ($\kappa_u = U_{обр.мах.}/U_{H.c.p.} = \pi$). Применяется при малых токах и высоких напряжениях нагрузки.

Рисунок 6.1 Однофазный однополупериодный выпрямитель

$$U_{н.ср.} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} U_{2m} \sin \omega t dt = \frac{1}{\pi} U_{2m} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0.45 U_2$$

$$U_2 = 2.22 U_{н.ср.}$$

$$U_{обр. max} = U_{2m} = \pi U_{н.ср.}$$

$$I_d = I_{н.ср.}$$

Двухполупериодный выпрямитель со средней точки трансформатора

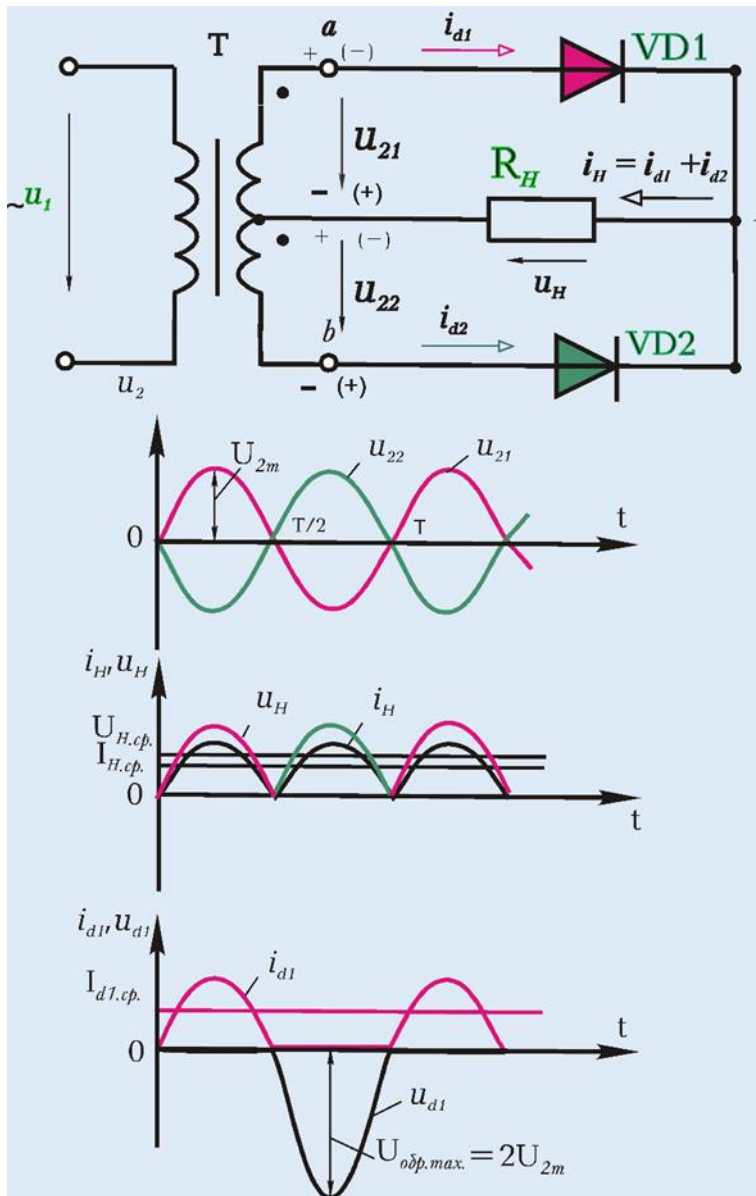


Рисунок 6.2 Однофазный выпрямитель со средней точкой трансформатора

Выпрямитель с выводом средней точки трансформатора. Напряжения вторичных полуобмоток u_{21} , u_{22} сдвинуты по фазе относительно средней точки трансформатора на 180° . При указанной без скобок полярности напряжений u_{21} , u_{22} к вентилю VD1 прикладывается прямое напряжение (плюс на анод, минус на катод), и вентиль открыт. Ток вентиля i_{d1} замыкается через нагрузку R_H и верхнюю полуобмотку трансформатора. Вентиль VD2 в это время находится под обратным напряжением ($U_{обр. max} = 2U_{2m}$) и ток не пропускает. Во второй полупериод ($T/2 - T$) из-за изменения полярности напряжения u_2 открывается вентиль VD2 и к нагрузке прикладывается напряжение нижней полуобмотки. Затем снова работает VD1 и т.д.

Напряжение нагрузки представляет собой следующие друг за другом положительные полусинусоиды. Недосток:

плохо используется вторичная обмотка трансформатора (работает лишь одна половина, $S_T = 1.48 P_H$)

$$U_{н.ср.} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} U_{2m} \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} U_{2m} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0.9 U_2$$

$$U_2 = 1.11 U_{н.ср.}$$

$$U_{обр. max} = 2 U_{2m} = \pi U_{н.ср.}$$

$$I_d = \frac{1}{2} I_{н.ср.}$$

Мостовой выпрямитель

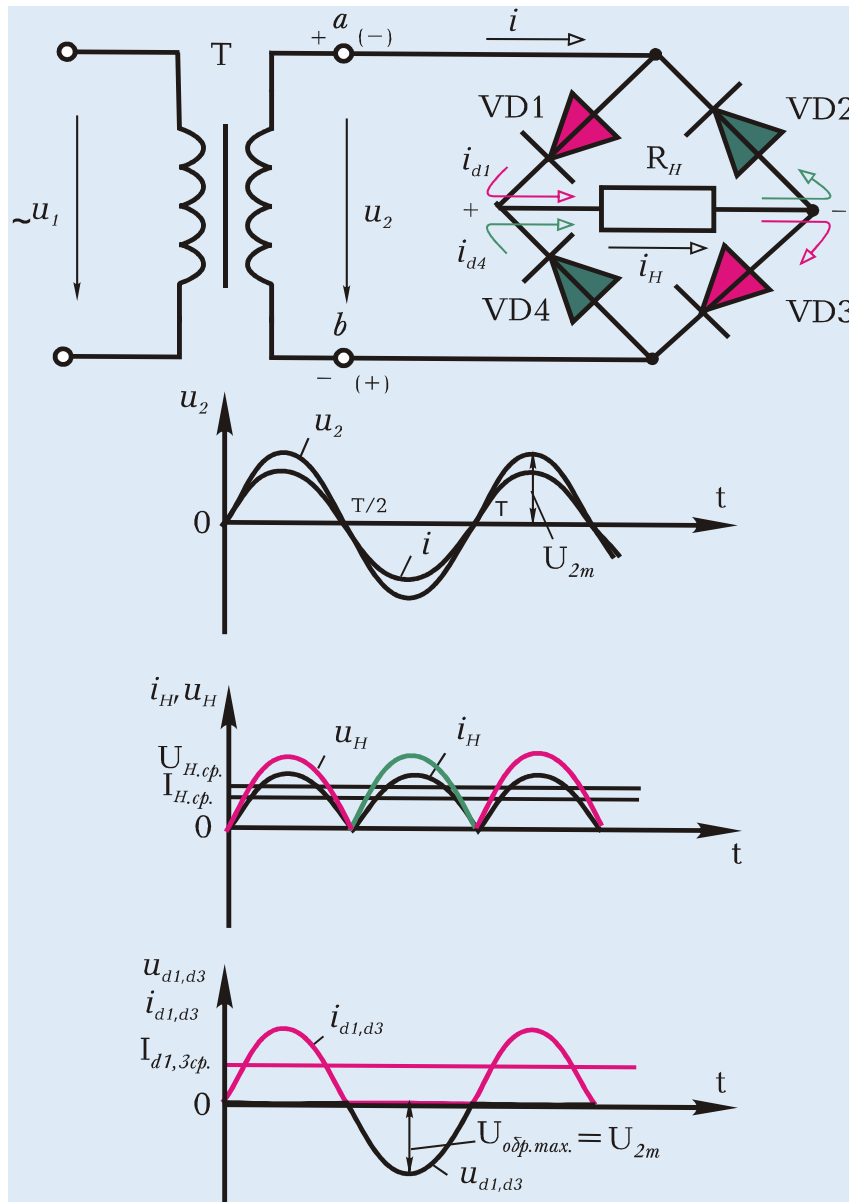


Рисунок 6.3 Однофазный мостовой выпрямитель

В мостовом выпрямителе четыре вентиля включены мостом, в одну диагональ которого подается питающее напряжение u_2 , а в другую - нагрузка R_H . Каждая пара вентилях ($VD1, VD3$ и $VD2, VD4$) работает поочередно. В первый полупериод (интервал $0 - T/2$) открыты вентили $VD1$ и $VD3$, т.к. положителен потенциал на анодах. Ток проходит через $VD1, R_H, VD3, T$. В этом интервале вентили $VD2$ и $VD4$ закрыты. В следующий полупериод ($T/2 - T$) потенциал точки **b** выше потенциала точки **a**, будут открыты вентили $VD2$ и $VD4$, а $VD1$ и $VD3$ - закрыты. В оба полупериода ток и напряжение нагрузки

имеют одинаковое направление. Эта схема применяется наиболее широко для установок средней и малой мощности, т.к. лучше используются трансформатор ($S_T = 1.23 P_H$) и вентили ($\kappa_u = \pi/2$).

$$U_{н.ср.} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} U_{2m} \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} U_{2m} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0.9 U_2$$

$$U_2 = 1.11 U_{н.ср.}$$

$$U_{обр.макс} = U_{2m} = \frac{\pi}{2} U_{н.ср.}$$

$$I_d = \frac{1}{2} I_{н.ср.}$$

6.2 Трехфазные выпрямители

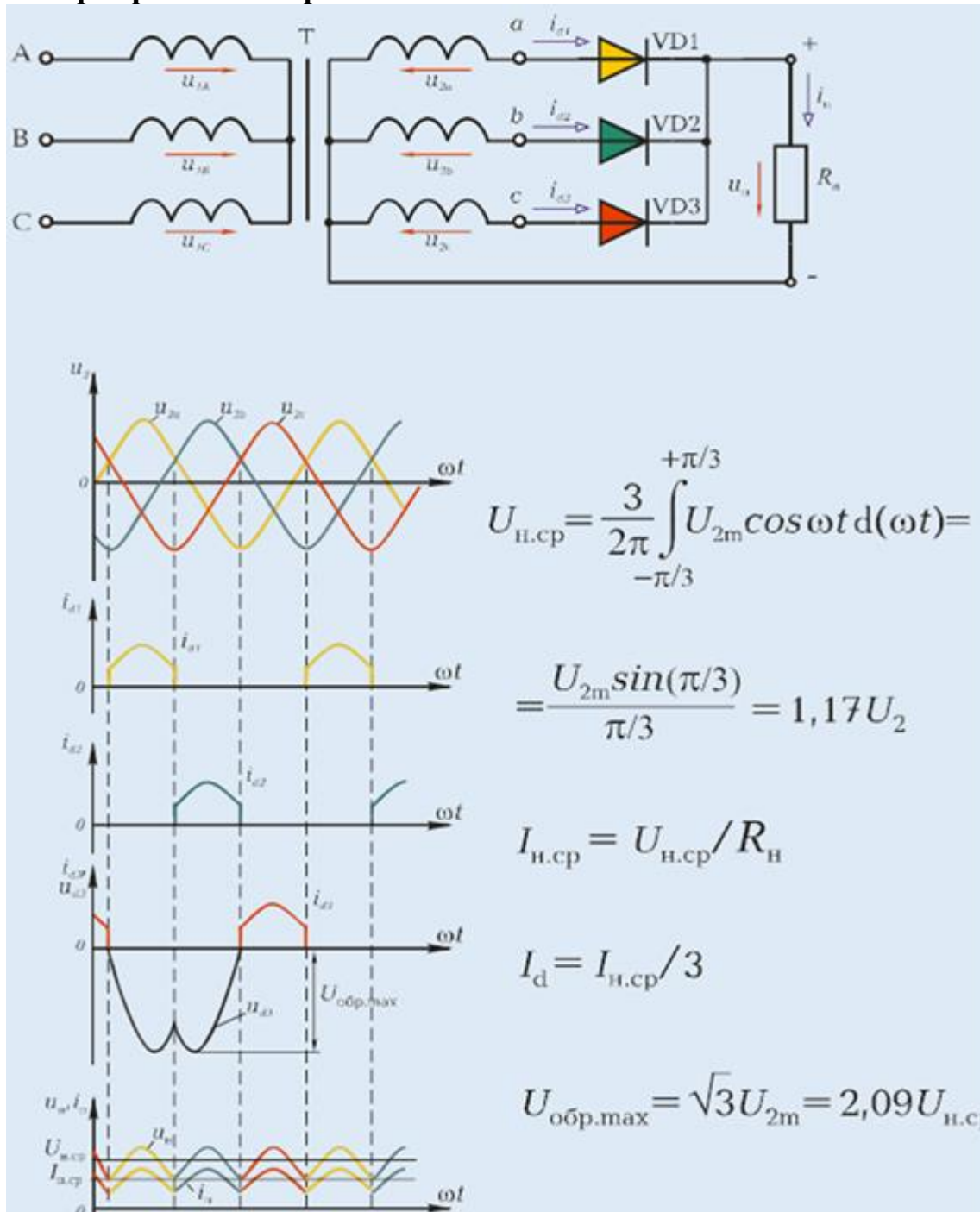


Рисунок 6.4 Трехфазный выпрямитель с нейтральным выводом трансформатора

Трехфазные выпрямители применяют для питания нагрузки средней и большой мощности. Их преимущества перед однофазными:

- 1) меньше пульсаций выпрямленного напряжения;
- 2) лучше используется мощность трансформатора

Трехфазный выпрямитель с нейтральным выводом трансформатора

Трёхфазный выпрямитель с нейтральным выводом состоит из трехфазного трансформатора Т, трех вентилей $VD1 - VD3$, аноды которых соединены с выводами вторичной обмотки трансформатора, а катоды объединены в один узел (рис 6.4). Нагрузка R_n включена между катодами и нейтралью трансформатора. Так как катоды вентилей имеют одинаковый потенциал, то проводящим (открытым) будет вентиль, у которого наиболее положительный потенциал на аноде, задаваемый фазными напряжениями трансформатора. На временной диаграмме видно, что вентили работают поочередно, каждый в течение трети периода. Выпрямленный ток в резисторе R_n имеет одинаковое направление и равен сумме выпрямленных токов каждой из фаз: $i_n = i_{d1} + i_{d2} + i_{d3}$. Коэффициент пульсаций $p = 0,25$. На закрытом вентиле (например, на $VD3$ при открытом $VD1$) потенциал анода $\varphi_a = u_{2c}$, потенциал катода $\varphi_k = u_{2a}$, напряжение на вентиле $u_{d3} = \varphi_a - \varphi_k = u_{2c} - u_{2a}$. Таким образом, к закрытому вентилу приложено линейное напряжение, и максимальное обратное напряжение на каждом вентиле равно амплитудному значению линейного напряжения. Недостатком данного выпрямителя является плохое использование трансформатора ($S_T = 1,35P_n$). Кроме того, обратное напряжение на вентиле в 2,09 раза превышает напряжение на нагрузке, поэтому выпрямитель применяют для выпрямления низких напряжений.

Трехфазный мостовой выпрямитель

Трехфазный мостовой выпрямитель имеет значительно лучшие показатели. Он содержит мост из шести вентилей (рис 6.5). Вентили $VD1, VD3, VD5$ образуют катодную группу, общая точка которой определяет положительный полюс на нагрузке R_n . Вентили $VD2, VD4, VD6$ образуют анодную группу с общей точкой, определяющей отрицательный полюс на нагрузке. В работе в открытом состоянии попарно находятся два вентиля (один из анодной, другой из катодной групп). Из группы $VD1, VD3, VD5$ открыт тот, у которого наиболее высокий потенциал на аноде, а из группы $VD2, VD4, VD6$ - у которого наиболее низкий потенциал на катоде. Например, в интервале $\omega t = \pi/2 \dots \pi$ будут открыты вентили $VD1$ и $VD4$, образуя замкнутую цепь для питания нагрузки R_n линейным напряжением u_{ab} . В момент $\omega t = \pi/2$ произойдет переключение вентилей: $VD4$ закроется, а $VD6$ откроется. За период напряжения питания происходит шесть переключений вентилей (шесть тактов). Каждый вентиль открыт 1/3 периода. Напряжение нагрузки определяется разностью потенциалов объединенных катодов и анодов вентилей, т.е. линейным напряжением вторичной обмотки трансформатора. Коэффициент пульсаций $p = 0,057$.

Мостовой выпрямитель находит самое широкое применение для установок большой мощности, т.к. в нем хорошо используются трансформатор ($S_T = 1.045P_H$) и вентили ($\kappa_V = U_{обр.\max}/U_{н.ср} = 1,045$; $\kappa_I = I_{d.\max}/I_{н.ср} = 1,045$).

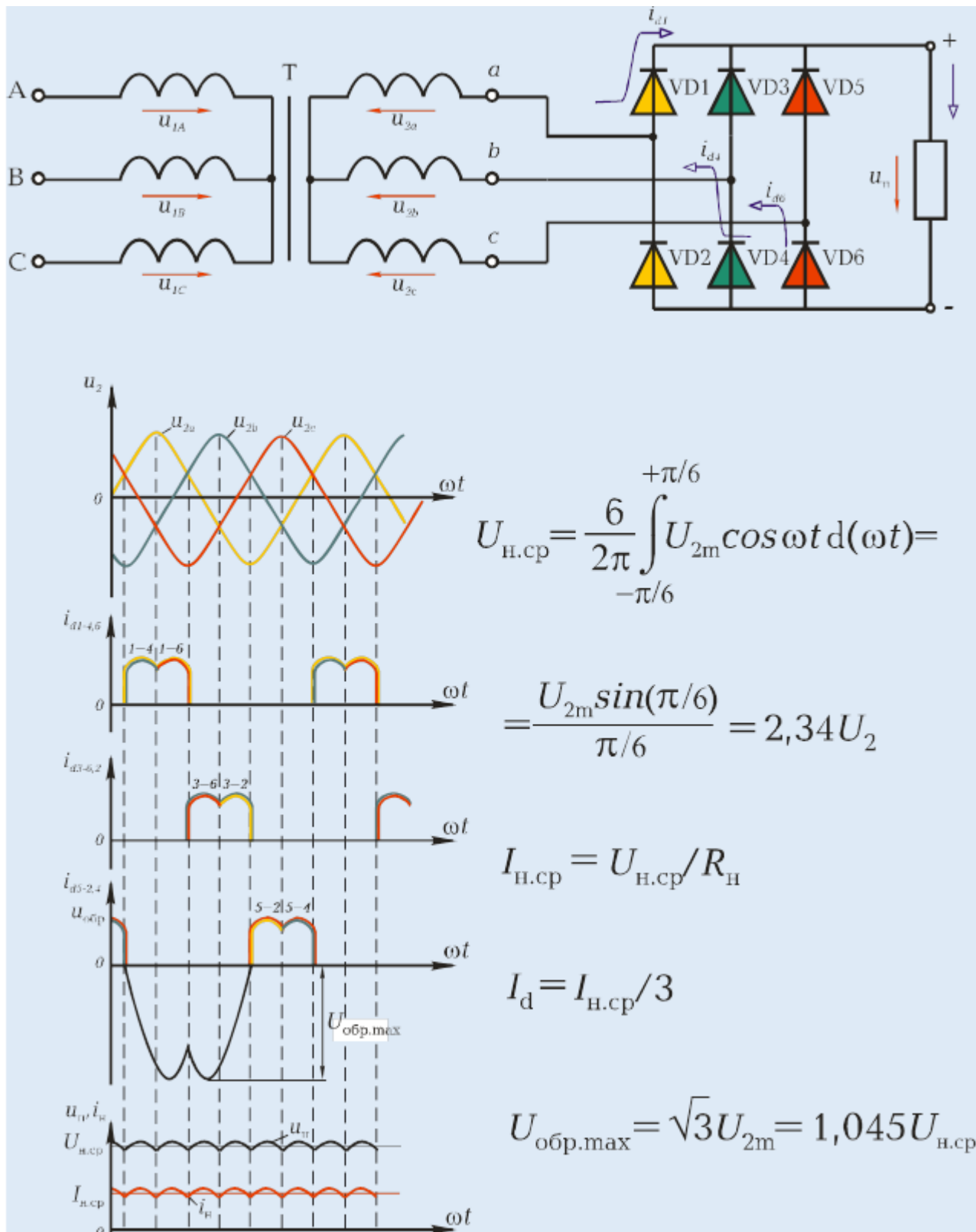


Рисунок 6.5 Трехфазный мостовой выпрямитель

ТЕМА 7. СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

Сглаживающим фильтром называют устройство, предназначенное для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения.

Основным параметром, характеризующим эффективность сглаживающего фильтра (СФ), является коэффициент сглаживания $q = p_{\text{вх}}/p_{\text{вых}}$, где $p_{\text{вх}}$ – коэффициент пульсаций на входе фильтра (т.е. для схемы выпрямителя без фильтра), а $p_{\text{вых}}$ – коэффициент пульсаций на выходе фильтра (т.е. для схемы выпрямителя с фильтром).

Сглаживающие фильтры различаются по следующим признакам:

- 1) в зависимости от типа фильтрующего элемента:
 - а) емкостные;
 - б) индуктивные;
 - с) электронные фильтры.
- 2) по количеству фильтрующих звеньев:
 - а) однозвенные;
 - б) многозвенные.

Емкостные фильтры

Емкостной фильтр представляет собой конденсатор, который включают параллельно нагрузочному резистору $R_{\text{н}}$. Схема однополупериодного выпрямителя с емкостным фильтром показана на рисунке 7.1.

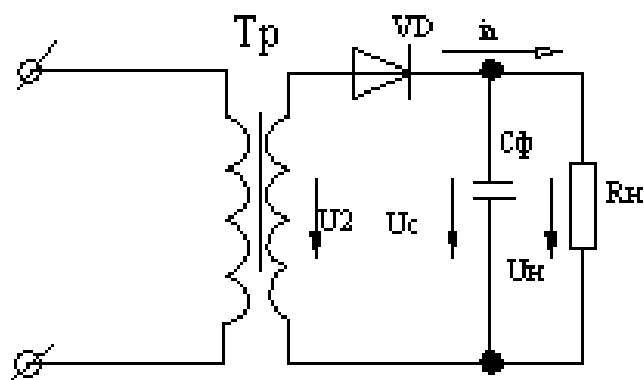


Рисунок 7.1. Схема однополупериодного выпрямителя с емкостным фильтром

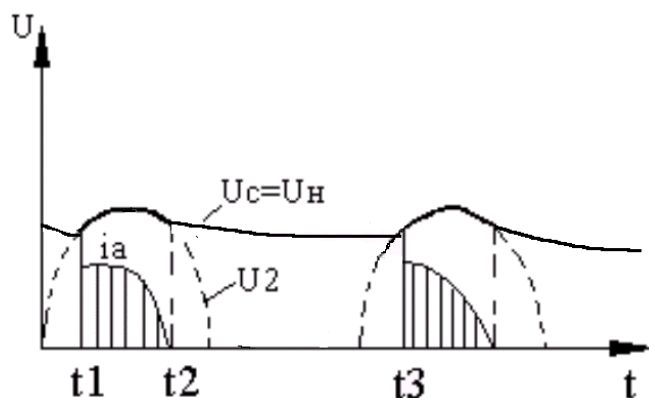


Рисунок 7.2. Временные диаграммы выпрямителя с емкостным фильтром

На временных диаграммах (рисунок 7.2) видно, что в интервале t_1-t_2 , конденсатор через открытый диод заряжается до амплитудного значения U_2 , так как в этот период $U_2 > U_c$. Когда $U_2 < U_c$, конденсатор разряжается на нагрузочный резистор R_n , заполняя разрядным током паузу в нагрузочном токе i_n , которая имеется в однополупериодном выпрямителе без фильтра.

После этого диод вновь открывается, СФ заряжается и процессы зарядки и разрядки СФ повторяются. Подобные СФ применяются с высокоомным сопротивлением R_n .

Коэффициент сглаживания емкостного фильтра $q_c = 2\pi f_1 m R_n C_\phi$,

где m – число пульсаций выпрямленного напряжения

Индуктивные фильтры.

Они состоят из дросселя L_ϕ , который включают последовательно с нагрузкой R_n (рисунок 7.3). Так как ток в цепи с дросселем во время переходного процесса при положительной полуволне U_2 , зависит от постоянной времени $\tau = L_\phi / R_n$, то длительность импульса увеличивается с ростом τ , что видно на временных диаграммах (рисунок 7.4).

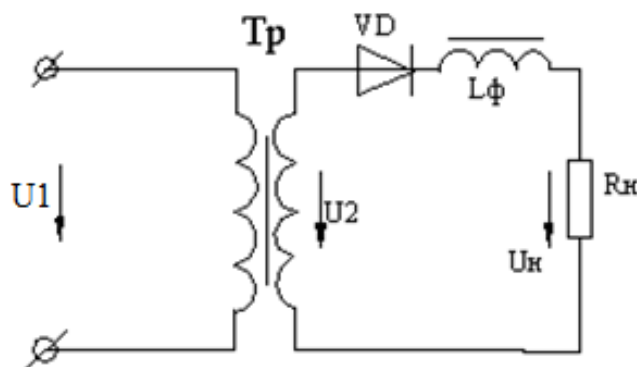


Рисунок 7.3. Схема включения индуктивного фильтра

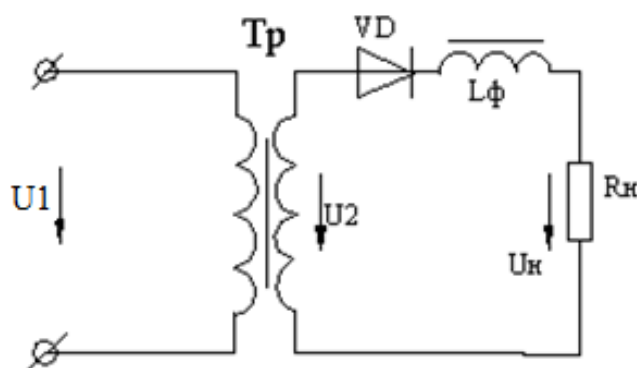


Рисунок 7.4. Временные диаграммы выпрямителя с индуктивным фильтром

Коэффициент сглаживания индуктивного фильтра $q_L = \frac{2\pi f_1 m L_\phi}{R_n}$,

где m – число пульсаций выпрямленного напряжения

Емкостные и индуктивные фильтры являются однозвенными фильтрами.

К многозвенным фильтрам относятся LC или RC – фильтры, которые обеспечивают большой коэффициент сглаживания пульсаций p и включены Г-образно или П-образно (рисунок 7.5 и 7.6).

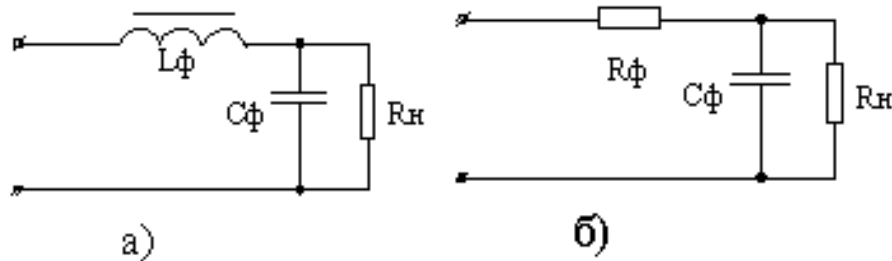


Рисунок 7.5 Г-образные а) LC - фильтр, б) RC – фильтр

Коэффициент сглаживания LC - фильтра: $q_{\Gamma} = \omega_{осн}^2 L_{\phi} C_{\phi}$.

В маломощных усилителях, где сопротивление $R_{н}$ составляет единицы кОм, вместо катушки включают резистор R_{ϕ} , что уменьшает массу, габариты и стоимость фильтра, однако при этом коэффициент сглаживания, определяемый как $q = (0,5 \div 0,9) \omega_{осн} R_{\phi} C_{\phi}$, будет меньше, чем у LC - фильтра.

В П – образных фильтрах коэффициент сглаживания равен произведению коэффициентов составных звеньев ($q_{\Pi} = q_C q_{\Gamma}$).

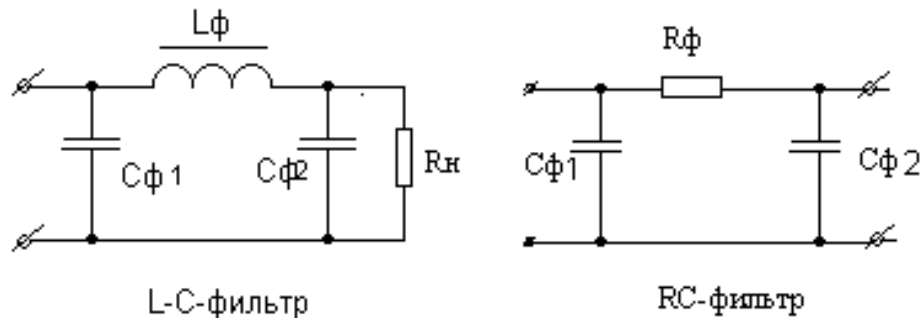


Рисунок 7.6. П-образные LC - фильтр и RC – фильтр

Электронные фильтры.

Электронные фильтры (ЭФ) – это фильтры, в которых вместо индуктивных катушек включают транзисторы, что позволяет избавиться от переходных процессов и уменьшить габариты и массу выпрямителей.

Применение транзисторов в фильтрах основано на различии сопротивлений для постоянной и переменной составляющих коллекторного тока [3, 4].

Из выходной характеристики транзистора (рис. 7.7) видно, что сопротивление $R_{кз}$ постоянному току (статическое сопротивление) $R_{cm} = U_{ко} / I_{ко}$ на 2-3 порядка меньше сопротивления переменному току (динамическое сопротивление) $R_{дин} = \Delta U_k / \Delta I_k$. Электронные фильтры снижают пульсации в 3-5 раз.

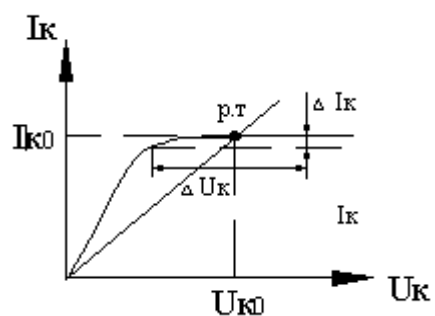


Рисунок 7.7 Выходная характеристика транзистора

Электронные фильтры могут быть подключены последовательно нагрузке (рис. 7.8, а) и параллельно нагрузке (рис. 7.8, б).

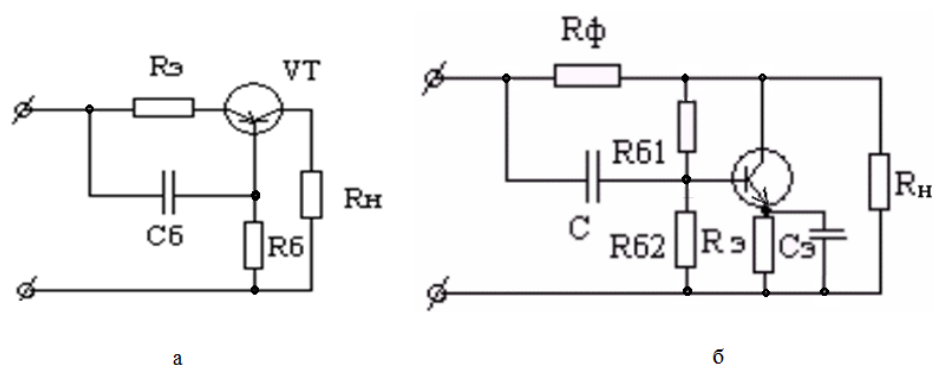


Рисунок 7.8. Электронные фильтры при последовательном подключении к нагрузке (а) и при параллельном подключении к нагрузке (б)

ТЕМА 8. СТАБИЛИЗАТОРЫ

Классификация и основные параметры стабилизаторов

Стабилизатор напряжения (или тока) – это устройство, автоматически обеспечивающее поддержание напряжения (или тока) нагрузочного устройства с заданной степенью точности при изменении питающего напряжения или режима работы нагрузки.

Классификация стабилизаторов

Стабилизаторы классифицируют по следующим признакам:

- 1) по стабилизируемой величине:
 - а) стабилизаторы напряжения;
 - б) стабилизаторы тока;
- 2) по способу стабилизации:
 - а) параметрические (ПС);
 - б) компенсационные (КС).

Основные параметры стабилизаторов

1. Коэффициент стабилизации по напряжению для стабилизаторов напряжения:

$$K_{ст.U} = \frac{\Delta U_{вх} / U_{вх}}{\Delta U_{вых} / U_{вых}},$$

где $\Delta U_{вх}$, $\Delta U_{вых}$ – приращения напряжений, $U_{вх}$, $U_{вых}$ – номинальные значения.

2. Коэффициент стабилизации тока для стабилизаторов тока:

$$K_{ст.I} = \frac{\Delta U_{вх} / U_{вх}}{\Delta I_{н} / I_{н}},$$

где $I_{н}$ – номинальный ток, а $\Delta I_{н}$ – приращение тока;

3. Внутреннее сопротивление стабилизатора $R_{ст}$;
4. Коэффициент полезного действия:

$$\eta_{ст} = P_{н} / (P_{н} + P_{П}),$$

где $P_{н}$ – полезная мощность в нагрузочном устройстве; $P_{П}$ – мощность потерь.

Параметрические стабилизаторы

В параметрических стабилизаторах напряжения используется полупроводниковый стабилитрон VD , который включают параллельно $R_{н}$.

Последовательно со стабилитроном включают балластный резистор $R_б$ для создания требуемого режима работы (рис. 8.1).

При изменении напряжения $U_{вх}$ под действием колебания напряжения питающей сети или изменения сопротивления нагрузки R_n , напряжение U_n изменяется незначительно, т.к. оно определяется напряжением $U_{ст}$ стабилитрона, которое мало изменяется при изменении протекающего через него тока, что видно на ВАХ стабилитрона (рис. 8.2).

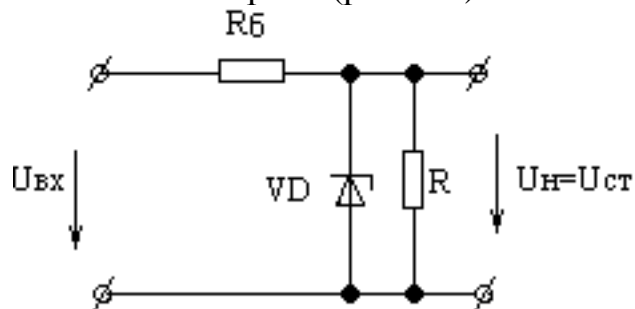


Рисунок 8.1 Параметрический стабилизатор напряжения

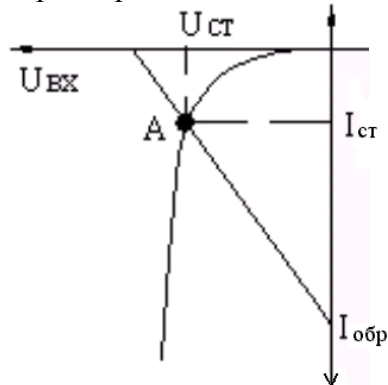


Рисунок 8.2 Обратная ветвь ВАХ стабилитрона

В параметрическом стабилизаторе тока используется нелинейный элемент (это может быть полевой или биполярный транзистор), который включают последовательно с нагрузочным устройством (рис. 8.3).

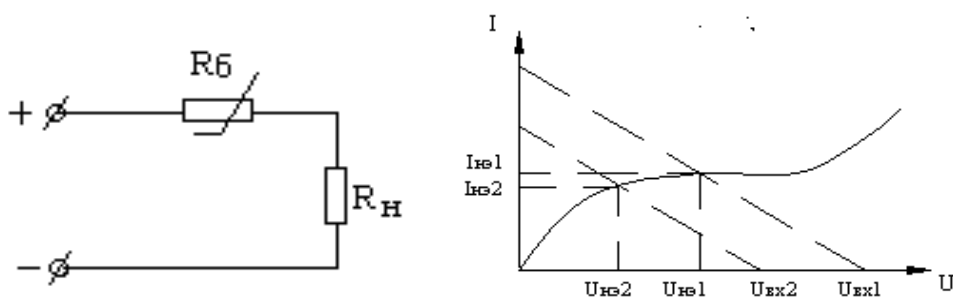


Рисунок 8.3 Обобщенная схема параметрического стабилизатора тока (а) и ВАХ нелинейного элемента (б)

ВАХ нелинейного элемента показывает, что при изменении напряжения от $U_{вх1}$ до $U_{вх2}$ напряжение на нагрузочном элементе изменяется от $U_{нэ1}$ до $U_{нэ2}$, а нагрузочный ток I_n практически не меняется.

Пример схемы стабилизатора тока представлен на рисунке 8.4.

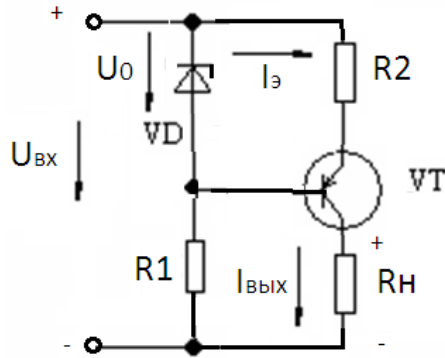


Рисунок 8.4. Схема стабилизатора тока

На базе VT (ОБ) потенциал $= \text{const}$, который задается VD ($U_o = \text{const}$). Т.к. $U_{\text{бэ}} = U_o - R_2 I$, то $I_z = (U_o - U_{\text{бэ}}) / R_2 = \text{const}$, тогда $I_{\text{вых}}$ не зависит от R_n , а определяется только U_o и R_2 .

Компенсационные стабилизаторы

Компенсационные стабилизаторы постоянных U и I , являются системами автоматического регулирования, в которых благодаря наличию отрицательной обратной связи обеспечивается постоянство напряжения U и тока I на нагрузочном устройстве с высокой степенью точности.

Компенсационные стабилизаторы подразделяются на стабилизаторы непрерывного действия и импульсные.

Структурная схема компенсационного стабилизатора напряжения непрерывного действия представлена на рис. 8.5.

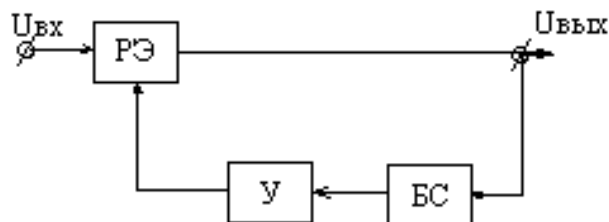


Рисунок 8.5. Структурная схема компенсационного стабилизатора напряжения непрерывного действия: БС – блок сравнения; У – усилитель постоянного тока; РЭ – регулирующий элемент

В блок сравнения (БС) входят источник опорного напряжения (параметрический стабилизатор, образованный элементами VD , R_{δ} , рис. 8.6) и резистивный делитель (R_1 , R_2 , R_3).

Усилитель постоянного тока (У) образован маломощным транзистором VT_2 и R_k . Регулирующий элемент (РЭ) – мощный транзистор VT_1 .

В данном компенсационном стабилизаторе происходит непрерывное сравнение U_n с опорным напряжением U_{on} .

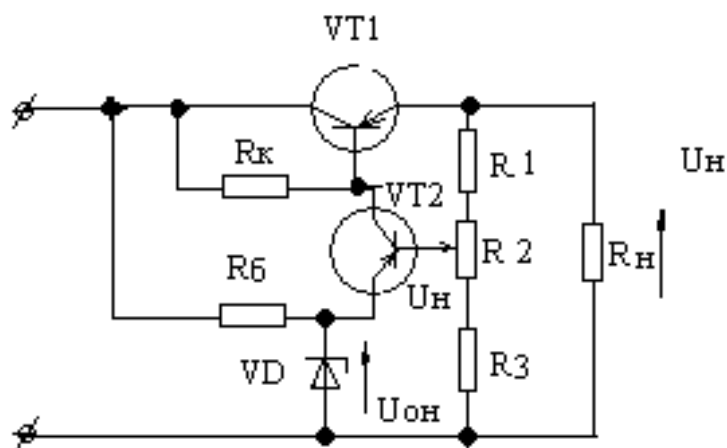


Рисунок 8.6. Принципиальная электрическая схема компенсационного стабилизатора напряжения непрерывного действия

Схема компенсационного стабилизатора тока почти аналогична схеме компенсационного стабилизатора напряжения, отличие заключается в том, что вместо резистивного делителя, включают переменный резистор $R_{рег}$ последовательно с сопротивлением R_H . Сигнал обратной связи, снимаемый с $R_{рег}$ и пропорциональный изменениям тока I_H , сравнивается с напряжением $U_{оп}$ и подается на вход усилителя.

Импульсные стабилизаторы постоянного напряжения (ИСПН) имеют высокий КПД (0,8...0,85), меньшие габариты и массу. Как и компенсационные стабилизаторы непрерывного действия, ИСПН является устройством, в котором применяется отрицательная обратная связь, ослабляющая изменение напряжения $U_{вых}$ или тока I_H .

Отличием ИСПН от компенсационного стабилизатора является работа РЭ – транзистора, который работает в режиме ключа, что дает возможность получить с его выхода однополярные импульсы прямоугольной формы $U_{кл}$ (рис. 8.7).

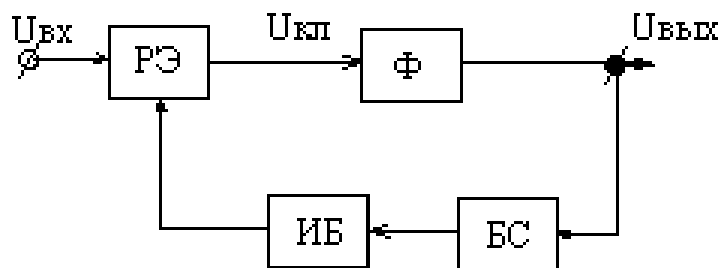


Рисунок 8.7 Структурная схема ИСПН:
Ф – сглаживающий фильтр; РЭ – регулирующий элемент;
БС – блок сравнения; ИБ – импульсный блок.

В БС напряжение $U_{вых}$ сравнивается с опорным, получающееся при этом разностное напряжение воздействует на ИБ, который вырабатывает управляющие импульсы разной длительности и частоты следования, которые управляют работой РЭ.

ТЕМА 9. УПРАВЛЯЕМЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Управляемые выпрямители – это устройства, которые позволяют плавно изменять значения выпрямленного напряжения [5, 6, 10].

Схема простейшего однофазного однополупериодного выпрямителя на тиристоре показана на рисунок 9.1.

Управление напряжением на выходе такой схемы сводится к управлению во времени моментом отпирания тиристора. Этот процесс осуществляется за счет сдвига фаз между анодным напряжением и напряжением, подаваемым на управляющий электрод тиристора. Такой сдвиг называют углом управления и обозначают α , а способ управления называют фазовым (рис. 9.2).

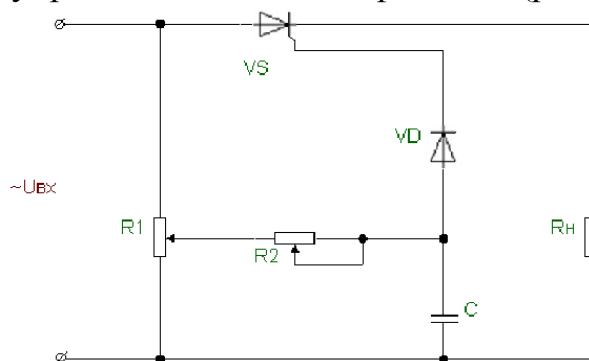


Рисунок 9.1 Схема однофазного однополупериодного выпрямителя на тиристоре

Управление величиной α осуществляют с помощью фазовращающей $R2C$ -цепи. Резистором $R1$ изменяют напряжение, подаваемое на управляющий электрод тиристора. Диод $VD1$ обеспечивает подачу на управляющий электрод положительных импульсов.

Оптимальной формой управляющих сигналов является короткий импульс с крутым фронтом, который обеспечивает четкое отпирание тиристора. Для формирования таких импульсов и их сдвига во времени используются импульсно-фазовые системы управления.

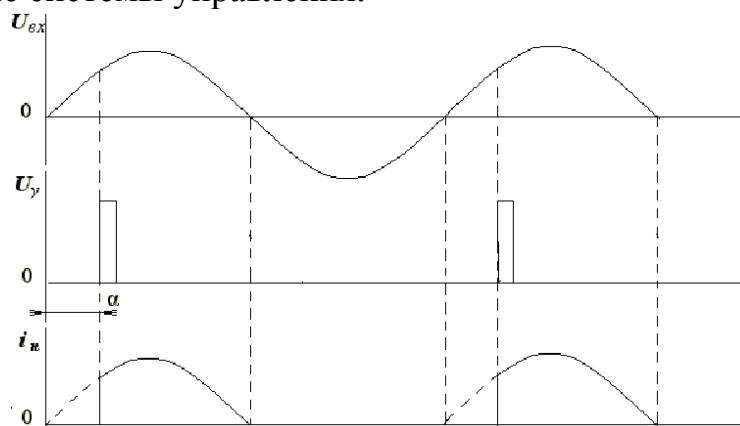


Рисунок 9.2 Временные диаграммы входного напряжения $U_{вх}$, напряжения управления U_y и тока на нагрузке i_n для однофазного однополупериодного управляемого выпрямителя

Однофазный двухполупериодный выпрямитель представлен на рис. 9.3. В такой схеме тиристоры работают поочередно, на управляющие электроды тиристоров сигналы управления подаются от импульсно-фазового блока управления (ИФБУ).

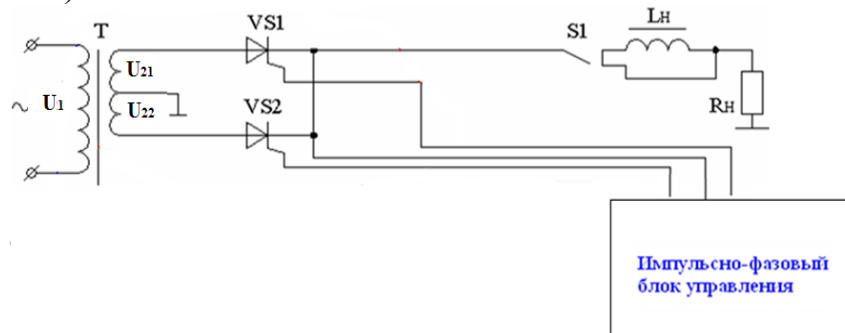


Рисунок 9.3 Схема однофазного двухполупериодного управляемого выпрямителя

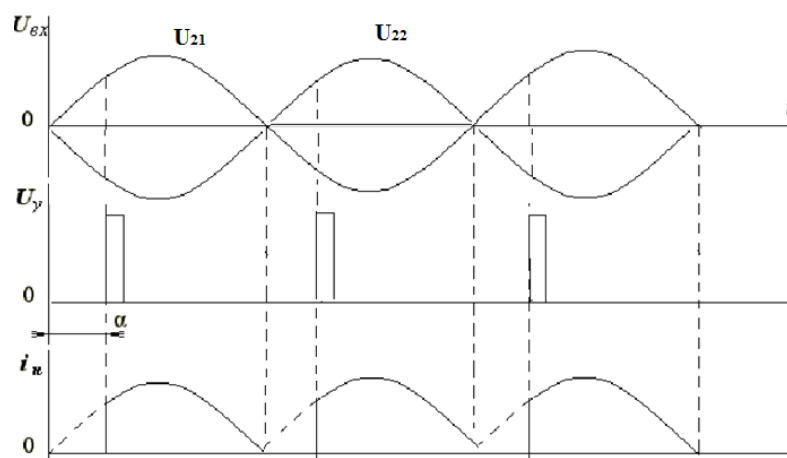


Рисунок 9.4 -Временные диаграммы входного напряжения $U_{вх}$, напряжения управления U_y и тока на нагрузке i_n для однофазного двухполупериодного управляемого выпрямителя

Если с помощью ИФБУ импульсы U_y сместить на угол α относительно напряжения u_2 , то проводящий тиристор откроется с запаздыванием, и будет пропускать ток только часть полупериода от α до π . В этом случае напряжение на нагрузке определяют.

$$U_{н\text{ ср}} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_{2m} \sin \omega t \, d\omega t = U_{но} \frac{1 + \cos \alpha}{2},$$

где $U_{но} = 0,9U_2$, среднее напряжение на нагрузке при $\alpha = 0$.

Таким образом, изменяя α от 0 до 180° , можно плавно регулировать $U_{н\text{ ср}}$ от $U_{но}$ до 0. Ток нагрузки повторяет u_n

$$I_{н\text{ ср}} = \frac{U_{н\text{ ср}}}{R_n} = I_{но} \frac{1 + \cos \alpha}{2}.$$

Основными характеристиками управляемого выпрямителя являются:

а) характеристика управления, которая выражает зависимость выпрямленного напряжения от угла управления $U_n = f(\alpha)$ (рис. 9.5);

б) внешние характеристики, которые определяют зависимость выпрямленного напряжения от выпрямленного тока при фиксированных значениях угла α (рис. 9.6).

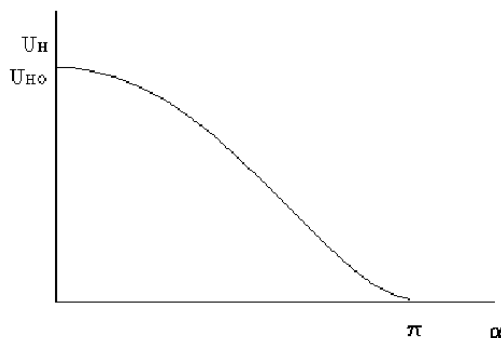


Рисунок 9.5 Характеристика управления

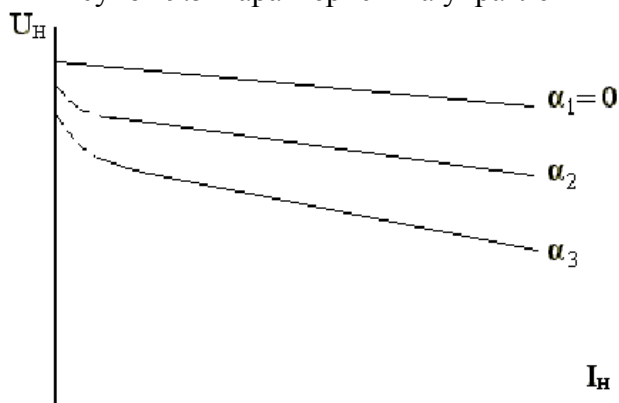


Рисунок 9.6 Внешние характеристики

Трехфазные управляемые выпрямители [1, 12] являются выпрямителями средней и большой мощности. Различают схему трехфазного выпрямителя с нулевым (или нейтральным) выводом и схему трехфазного мостового выпрямителя.

Трехфазный выпрямитель с нулевым (или нейтральным) выводом (рис. 9.7) обычно работает на активно-индуктивную нагрузку. Длительность работы тиристоров определяется углом управления α , значение которого задается импульсно-фазовым блоком управления (ИФБУ). Изменение угла α приводит к изменению средних значений выпрямленного напряжения $U_{нср}$ и $I_{нср}$ тока. Это видно на временных диаграммах при индуктивной нагрузке $L_n = 0$ (рис. 9.8).

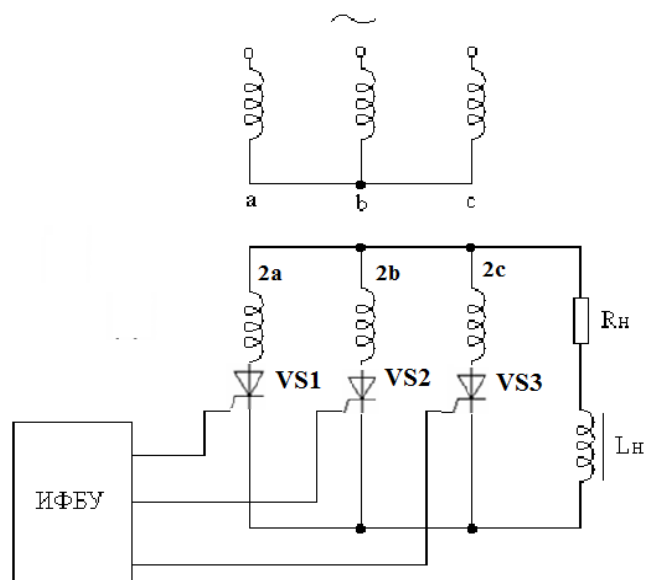


Рисунок 9.7 Схема трехфазного выпрямителя с нулевым (или нейтральным) выводом

При угле управления $\alpha < \pi/6$ выпрямленный ток i_n имеет непрерывный характер и каждый тиристор открыт в течение времени, соответствующего углу $2/3\pi$. При угле управления $\alpha > \pi/6$ в выпрямленном токе i_n появляются паузы.

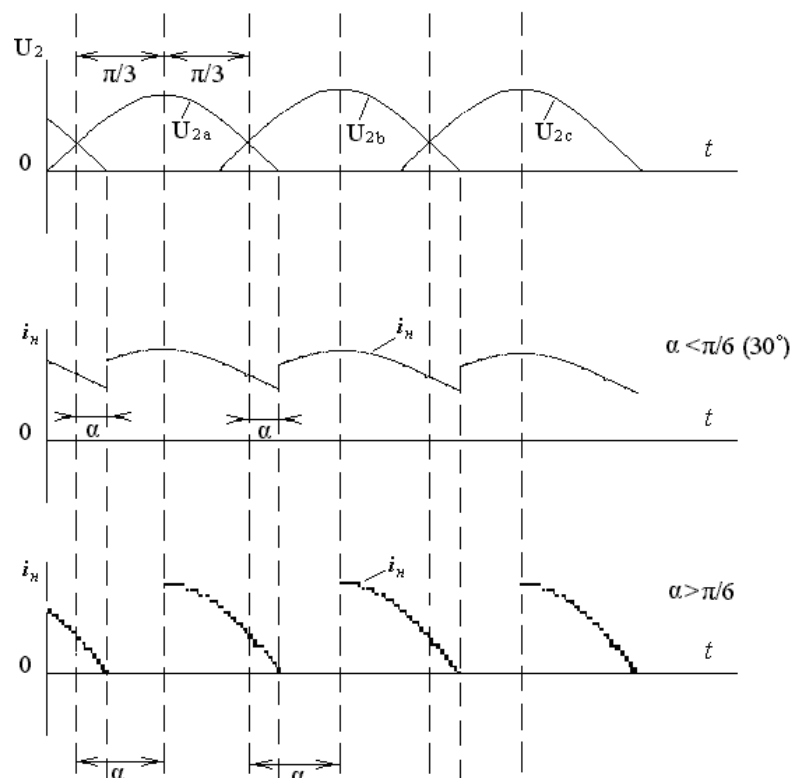


Рисунок 9.8 Временные диаграммы трехфазного выпрямителя с нулевым выводом

Характеристика управления трехфазного выпрямителя показана на рис. 9.9, откуда видно, что при $L_n = 0$ напряжение $U_{нср}$ равно нулю при $\alpha = 150^\circ$. При $L_n = \infty$, напряжение на нагрузочном устройстве становится равным нулю при угле управления $\alpha = 90^\circ$. Характеристики управления при $L_n \neq 0$ и $L_n \neq \infty$ располагаются между этими двумя предельными характеристиками.

Нагрузочный ток i_n при $L_n = \infty$ будет сглаживаться и иметь непрерывный характер при $\alpha > \pi/6$.

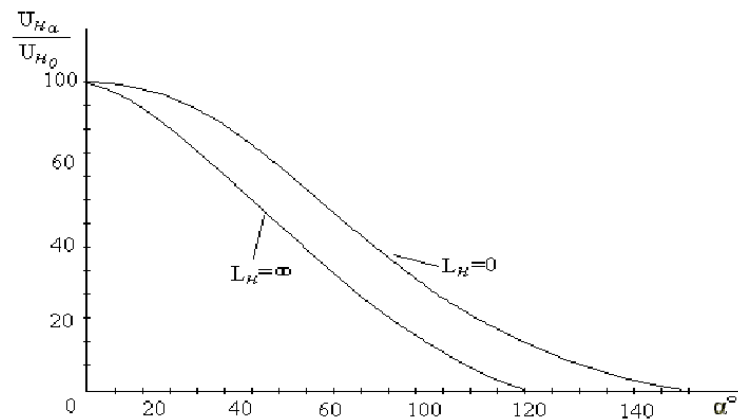


Рисунок 9.9 Характеристика управления трехфазного выпрямителя

В схему трехфазного мостового управляемого выпрямителя входят шесть тиристоров (рис. 9.10). Тиристоры $VS1$, $VS2$, $VS3$ объединены в катодную группу, а тиристоры $VS4$, $VS5$, $VS6$ – в анодную группу.

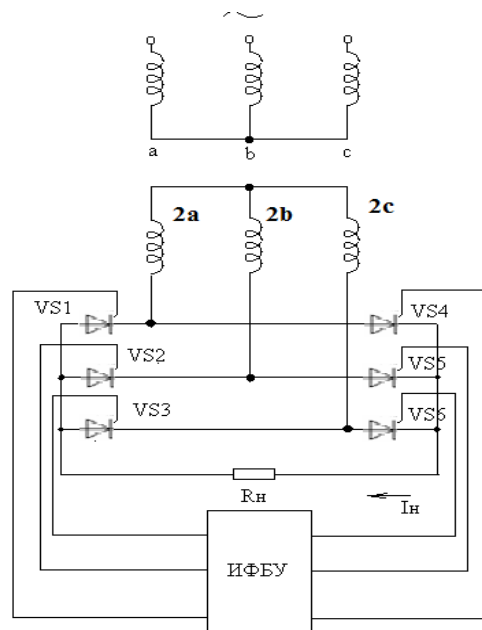


Рисунок 9.10 Схема трехфазного мостового выпрямителя

Также, как и в неуправляемом выпрямителе здесь одновременно работают два тиристора: один из анодной группы, другой – из катодной. При этом управляющий сигнал, подаваемый на тиристор катодной группы, опережает на 180° сигнал, поступающий на тиристор анодной группы.

Характеристики управления выглядят так же, как для выпрямителя с нулевым выводом. Отличие лишь в том, что предельным углом управления, при котором $U_{нсп} = 0$, является угол $\alpha = 120^\circ$. Внешние характеристики трехфазных управляемых выпрямителей имеют такой же вид, как внешние характеристики неуправляемых выпрямителей.

ТЕМА 10. ЭЛЕКТРОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Электронным усилителем называют устройство, предназначенное для увеличения параметров входного электрического сигнала (напряжения, тока или мощности) за счет преобразования энергии источника питания в энергию выходного сигнала (рис. 10.1).

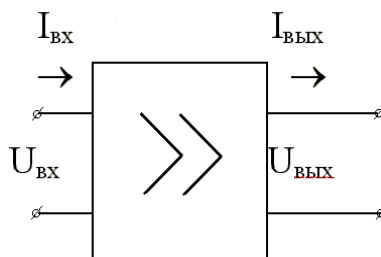


Рисунок 10.1 - К определению параметров усилителя

В зависимости от режима работы можно выделить два класса усилителей: с линейным режимом работы и нелинейным режимом работы.

Усилитель *с линейным режимом работы* обеспечивает на выходе сигнал, близкий по форме к входному. Многие усилители состоят из нескольких ступеней, которые осуществляют последовательное усиление сигнала и называются каскадами.

В усилителях *с нелинейным режимом работы* отсутствует пропорциональность между мгновенными значениями входного и выходного токов I и напряжения U . После достижения некоторой величины напряжения входного сигнала напряжение на выходе остается неизменным, т.е. ограничивается на некотором уровне. Такие усилители нашли применение в устройствах для преобразования синусоидального сигнала в импульсный.

Усилители *с линейным режимом работы* классифицируются:

- 1) в зависимости от параметра, который необходимо усилить:
 - усилители напряжения,
 - усилители тока,
 - усилители мощности;
- 2) по элементной базе:
 - ламповые усилители,
 - усилители на биполярных транзисторах,
 - усилители на полевых транзисторах.
- 3) по диапазону усиливаемых частот:
 - усилители постоянного тока (УПТ) ,
 - усилители низкой (звуковой) частоты (УНЧ, УЗЧ);
 - усилители высокой частоты (УВЧ);
 - широкополосные усилители (ШПУ);
 - избирательные усилители (ИУ).
- 4) по способу соединения каскадов между собой в многокаскадном усилителе:

- усилители с непосредственной (гальванической) или резистивной связью (используется в УПТ),
- усилители с резистивно-емкостной связью (используется в усилителях переменного напряжения: УНЧ, УВЧ, ШПУ),
- усилители с трансформаторной связью (используется в усилителях мощности).

Основные параметры усилителя:

коэффициент усиления по напряжению: $K_U = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}}$;

коэффициент усиления по току: $K_I = I_{\text{ВЫХ}} / I_{\text{ВХ}}$;

коэффициент усиления по мощности: $K_P = P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ВХ}} = K_U K_I$;

входное сопротивление $R_{\text{ВХ}}$;

выходное сопротивление $R_{\text{ВЫХ}}$;

полоса пропускания усилителя $\Delta f = f_{\text{В}} - f_{\text{Н}}$, где $f_{\text{В}}$ и $f_{\text{Н}}$ верхняя и нижняя граничные частоты, которые определяются на уровне 0,707 от $K_{U\text{ср}}$ (т.е. коэффициент усиления на $f_{\text{В}}$ и $f_{\text{Н}}$ уменьшается в $\sqrt{2}$ раз).

Основные характеристики усилителя:

1) амплитудная характеристика (АХ), выражает зависимость выходного напряжения от входного $U_{\text{ВЫХ.м}} = f(U_{\text{ВХ.м}})$ (рис. 10.2, а);

2) амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) $K_U = f(f)$, отражает зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты (рис. 10.2, б);

3) фазо-частотная характеристика (ФЧХ) $\varphi = f(f)$, отражает зависимость угла сдвига фазы выходного сигнала по отношению к фазе входного сигнала (рис. 10.2, в).



Рисунок 10.2 Характеристики усилителя: а – амплитудная; б – амплитудно-частотная; в – фазо-частотная

Амплитудная характеристика имеет линейный участок, где наблюдается пропорциональная зависимость между $U_{\text{ВХ.м}}$ и $U_{\text{ВЫХ.м}}$. Шумы в усилителе и другие помехи приводят к тому, что при $U_{\text{ВХ}} = 0$ на выходе усилителя имеется некоторое напряжение. При $U_{\text{ВХ}} > U_{\text{ВХ.мах}}$ пропорциональность между входным и выходным напряжениями нарушается из-за нелинейности ВАХ транзистора,

что приводит к ограничению амплитуды выходного сигнала и искажению его формы. Такие искажения называются нелинейными.

Таким образом, АХ условно можно разделить на два участка:

- линейный, где наблюдается пропорциональная зависимость амплитуды выходного напряжения от амплитуды входного сигнала;
- нелинейный, где пропорциональная зависимость нарушается.

Такие искажения выходного сигнала, которые возникают ввиду нелинейности входных и выходных ВАХ транзисторов, называют нелинейными и оцениваются коэффициентом нелинейных искажений [6]:

$$k = \frac{\sqrt{P_2 + P_3 + P_4 + \dots}}{\sqrt{P_1}} \cdot 100\%$$

где P_1 – мощность в нагрузке, обусловленная основной гармонической составляющей напряжения; $P_2, P_3, P_4 \dots$ – мощности, выделяемые в нагрузке под воздействием 2-ой, 3-ей, 4-ой и т.д. гармонических составляющих напряжения.

Частотные искажения сигнала на АЧХ обусловлены наличием в схеме усилительного каскада частотно-зависимых элементов (емкостей). Уменьшение K_U в области нижних и верхних частот (на частотах меньше f_n и больше f_v) определяется частотными искажениями сигнала. Количественно эти искажения оцениваются коэффициентом частотных искажений:

$$M_n = M_v = K_{U\text{ ср}} / K_{U\text{ н(в)}} \approx \sqrt{2},$$

где $K_{U\text{ ср}}$ – коэффициент усиления в области средних частот.

Появление фазового сдвига на ФЧХ объясняется задержкой сигнала в усилителе. ФЧХ усилителя показывает, что в области нижних частот выходное напряжение опережает по фазе входное, а в области верхних частот отстает от него. В предельных случаях при $f \rightarrow 0$ и $f \rightarrow \infty$ угол сдвига фаз стремится к $\pi/2$ и $-\pi/2$ соответственно. Фазовые и частотные искажения сигнала, вносимые усилителем, называют линейными искажениями, так как обусловлены линейными элементами схемы и не приводят к искажению формы выходного сигнала.

Принцип построения усилительных каскадов

Рассмотрим структурную схему [3, 5] (рис. 10.3).

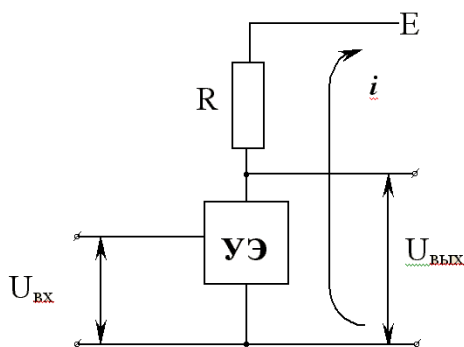


Рисунок 10.3 Структурная схема усилителя

Основными элементами каскада являются усилительный элемент УЭ, которым является биполярный или полевой транзистор, резистор R и источник питания E [2].

Процесс усиления основывается на преобразовании энергии источника постоянного напряжения E в энергию переменного напряжения в выходной цепи за счет изменения сопротивления УЭ по закону, который задается входным сигналом.

Одним из наиболее распространенных усилительных каскадов является каскад с общим эмиттером ОЭ (рис. 10.4).

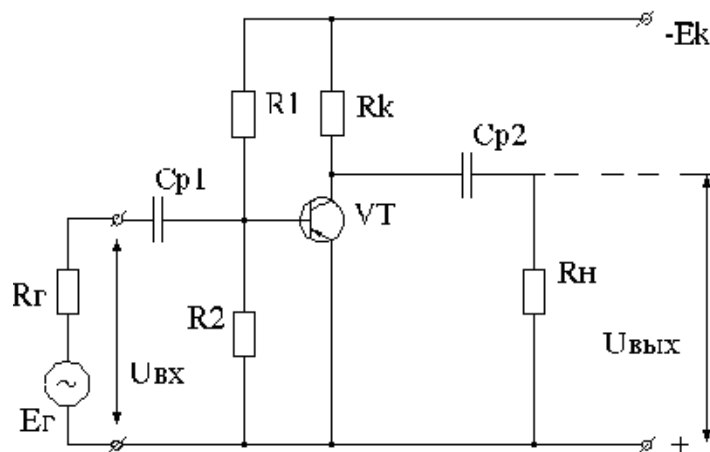


Рисунок 10.4 - Схема усилительного каскада с ОЭ

Основные элементы схемы:

- источник питания E_K («+» E_K для $n-p-n$, «-» E_K для $p-n-p$);
- биполярный транзистор $n-p-n$ -типа (VT);
- сопротивление в цепи коллектора R_K , с помощью которого создается выходное напряжение.

К вспомогательным элементам каскада относятся:

- разделительный конденсатор C_{P1} , который не пропускает постоянную составляющую тока, т.е. исключает шунтирование входной цепи каскада цепью источника питания по постоянному току;
- разделительный конденсатор C_{P2} , не пропускает постоянной составляющей напряжения в нагрузку или в следующий каскад;
- делитель напряжения $R1/R2$, включенный в цепь базы. Обеспечивает требуемую работу транзистора в режиме покоя, т.е. в отсутствие входного сигнала.

Особенности многокаскадных усилителей

В многокаскадных усилителях число каскадов зависит от требуемых значений коэффициентов усиления K_U , K_I , K_P . Чем больше необходимо получить коэффициент усиления, тем больше количество каскадов,

последовательно соединенных между собой. Структурная схема многокаскадного усилителя приведена на рис. 10.5.

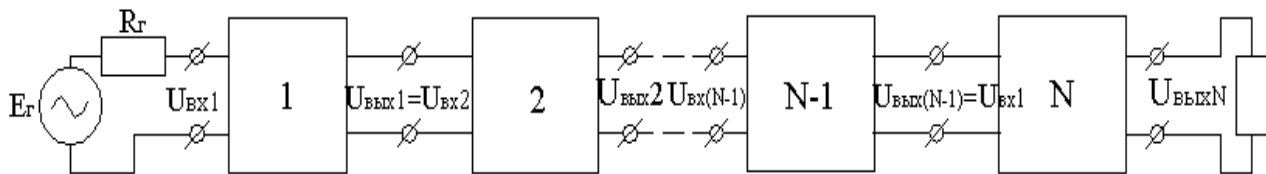


Рисунок 10.5 Структурная схема многокаскадного усилителя

Коэффициент усиления многокаскадного усилителя равен произведению коэффициентов усиления, входящих в него каскадов:

$$K_U = \frac{U_H}{E_\Gamma} = \frac{U_{\text{ВЫХ}1}}{E_\Gamma} \cdot \frac{U_{\text{ВЫХ}2}}{U_{\text{ВХ}2}} \dots \frac{U_{\text{ВЫХ}N}}{U_{\text{ВХ}N}} = K_{U1} \cdot K_{U2} \dots K_{UN}$$

Следует отметить, что с увеличением числа каскадов коэффициент частотных искажений увеличивается: $M = M_1 M_2 M_3 \dots M_n$ и, как следствие, Δf усилителя уменьшается.

Угол фазового сдвига в многокаскадном усилителе равен сумме углов фазовых сдвигов, создаваемых всеми конденсаторами в схеме:

$$\varphi_H = \varphi_{\text{нр}1} + \varphi_{\text{нр}2} + \dots + \varphi_{\text{нр}n}$$

ТЕМА 11. УСИЛИТЕЛЬНЫЙ КАСКАД

Принцип действия каскада на биполярном транзисторе с общим эмиттером

Основными элементами каскада являются управляемый элемент - биполярный транзистор VT , включение которого по схеме с общим эмиттером (ОЭ) обеспечивает наибольший коэффициент усиления по току, напряжению, мощности.

В выходную цепь каскада включается источник E_k , за счет которого происходит усиление мощности выходного сигнала. Разделительные конденсаторы $C1$ и $C2$ на рабочей частоте имеют сопротивления X_{C1} и X_{C2} близкие к нулю. Источник усиливаемого сигнала подключается к входной цепи каскада (между базой и эмиттером) через конденсатор $C1$, а нагрузочное устройство с сопротивлением R_n - к выходу каскада через конденсатор $C2$. Конденсаторы $C1$ и $C2$ разделяют эти цепи по постоянному току и связывают их по переменному. Резистор R_k оказывает влияние на коэффициент усиления каскада по напряжению, включается в коллекторную цепь транзистора. Звено $R_э - C_э$ обеспечивает температурную стабилизацию работы каскада.

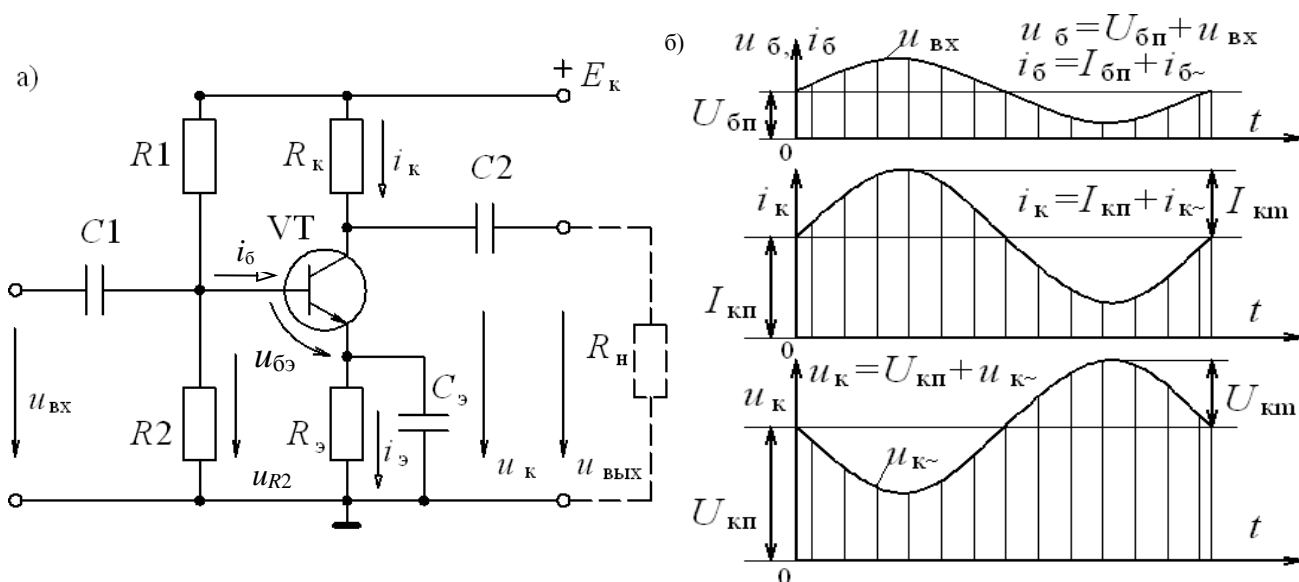


Рисунок 11.1 Усилительный каскад на биполярном транзисторе:

а) схема каскада, б) временные диаграммы

Напряжение покоя между базой и эмиттером $U_{бп}$ определяется делителем напряжения $R1 - R2$ и резистором $R_э$, в результате возникают токи базы $I_{бп}$ и коллектора $I_{кп}$. Режим работы усилителя при $u_{ВХ} = 0$ называют режимом покоя.

При подаче входного сигнала $u_{ВХ}$ на постоянную составляющую тока $I_{бп}$ накладывается переменная составляющая $i_{б\sim}$, и ток базы становится пульсирующим $i_б$ (рис. 11.1, б). Он вызывает пульсацию тока коллектора $i_к = \beta i_б$ и коллекторного напряжения $u_к$. Переменная составляющая напряжения $u_{к\sim}$ через конденсатор $C2$ передается в нагрузку: $u_н = u_{ВЫХ}$.

По второму закону Кирхгофа для выходной цепи

$$E_K = u_K + R_K i_K = (U_{KП} + u_{K\sim}) + R_K (I_{KП} + i_{K\sim}).$$

Так как $E_K = \text{const}$ и режим по постоянному току не меняется, то видно, что с увеличением тока $i_{K\sim}$ напряжение $u_{K\sim}$ уменьшается, оно сдвинуто по фазе относительно входного напряжения на 180° (рис. 11.1, б).

Температурная стабилизация каскада

Недостатком полупроводниковых усилителей является зависимость их параметров от температуры. Для уменьшения влияния температуры в рассмотренном усилительном каскаде с ОЭ применена эмиттерная температурная стабилизация: в цепь эмиттера включен резистор $R_э$, шунтированный конденсатором $C_э$. С увеличением температуры возрастают токи транзистора $I_{КП}$, $I_{ЭП}$, но возникающее падение напряжения на резисторе $R_э$ уменьшает напряжение $U_{бэП} = U_{R2} - R_э I_{ЭП}$ (при $U_{R2} = \text{const}$), что повлечет уменьшение токов $I_{бП}$, $I_{ЭП}$, $I_{КП}$. Стабилизация тем эффективнее, чем больше $R_э$, но падение напряжения на $R_э$ уменьшает $U_{бэ}$ и снижает коэффициент усиления, что нежелательно. Это явление называют отрицательной обратной связью (ООС). Для ослабления ООС по переменному напряжению резистор $R_э$ шунтируют конденсатором $C_э$, сопротивление которого $X_{Cэ} \ll R_э$ для всех частот $u_{вх}$. Тогда падение напряжения на участке $R_э - C_э$ от переменной составляющей $i_э$ незначительно, и усиливаемое напряжение практически не меняется: $u_{бэ} \approx u_{вх}$.

Расчет каскада

Коэффициент усиления и другие параметры усилителя (входное и выходное сопротивления) рассчитываются аналитически с помощью h -параметров транзистора. Для этого используется схема замещения усилительного каскада с ОЭ для переменных составляющих токов и напряжений (рис. 11.2).

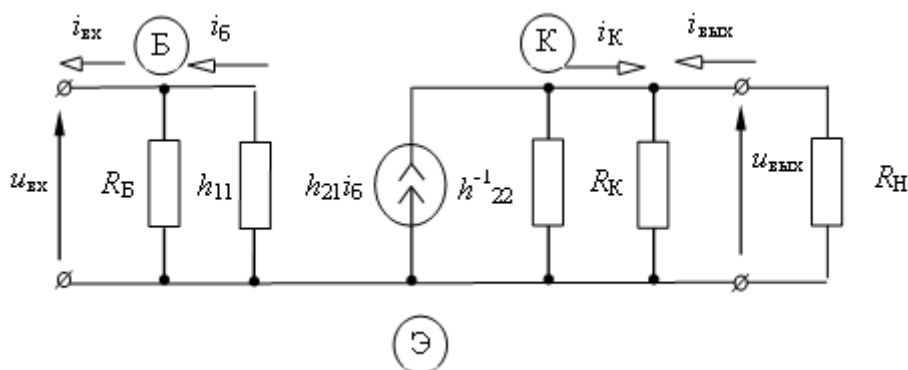


Рисунок 11.2 Схема замещения каскада в h -параметрах

В схеме замещения усилительного каскада не учтены конденсаторы и источник питания, так как переменные составляющие напряжения на них принимаются равными нулю, поэтому резистивный элемент $R_Н$ включен между коллектором и эмиттером транзистора, т. е. между точками К и Э.

Делитель напряжения, резисторы $R1 - R2$ относительно входного сигнала

включены параллельно с транзистором, входное сопротивление которого представляет величина h_{11}

$$R_B = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2};$$

Определяем входное сопротивление каскада

$$R_{BX} = \frac{R_B \cdot h_{11}}{R_B + h_{11}}$$

Коэффициент усиления по напряжению находим с помощью уравнений для входной и выходной цепей (рис.11.2), так как $h_{22}^{-1} \gg R_K$, то им можно пренебречь:

$$u_{BX} = i_{\phi} \cdot h_{11};$$

$$u_{ВЫХ} = -h_{21} \cdot i_{\phi} \cdot \frac{R_K \cdot R_H}{R_K + R_H};$$

$$K_u = \frac{u_{ВЫХ}}{u_{BX}} = -\frac{h_{21}}{h_{11}} \cdot \frac{R_K \cdot R_H}{R_K + R_H}$$

(минус показывает, что $u_{ВЫХ}$ в противофазе с u_{BX}).

Коэффициент усиления по току

$$i_{BX} = \frac{u_{BX}}{R_{BX}}; \quad i_{ВЫХ} = \frac{u_{ВЫХ}}{R_H};$$

$$K_I = \frac{i_{ВЫХ}}{i_{BX}} = \frac{u_{ВЫХ}}{u_{BX}} \cdot \frac{R_{BX}}{R_H} = K_U \cdot \frac{R_{BX}}{R_H}$$

Коэффициент усиления мощности

$$K_P = K_U \cdot K_I$$

Расчет усилительного каскада с ОЭ можно провести графически. Для этого на семействе коллекторных (выходных) характеристик (рис. 11.3) необходимо провести из точки E_K на оси абсцисс линию нагрузки, удовлетворяющую уравнению $U_K = E_K - R_K I_K$. По точкам пересечения ее с выходными характеристиками определяется коллекторный ток I_K , напряжения U_K и U_{RK} для данного сопротивления R_K и различных значений тока базы I_{ϕ}

Анализ работы усилительного каскада проводится с помощью передаточной (переходной) характеристики $I_K(I_{\phi})$, которая строится по точкам пересечения линии нагрузки с выходными характеристиками транзистора. На рис 11.3 приведена входная характеристика $U_{\phi\phi}(I_{\phi})$, повернутая на 90° , и дано построение переходной характеристики.

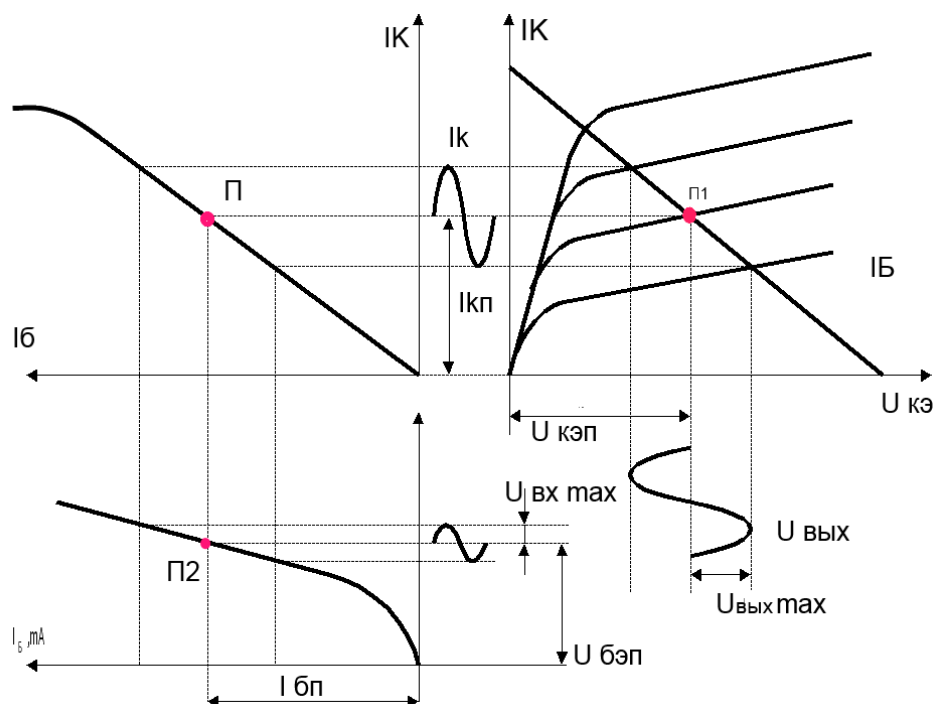


Рисунок 11.3 Графоаналитический расчет каскада

Видно, что переходная характеристика имеет практически линейный участок при изменении тока базы от нуля до некоторого значения, зависящего от типа транзистора и сопротивления R_k . Сопротивление резистора R_k выбирают, исходя из требуемого усиления входных сигналов

Точку **П** определяющую режим покоя транзистора выбирают в середине линейного участка передаточной характеристики, для усиления без искажения положительной и отрицательной полуволн входного напряжения. При проецировании точки **П** на семейство выходных характеристик транзистора находим положение **П1**, что позволяет определить $I_{кп}$ и $U_{кэп}$. Проекция **П** на входную характеристику транзистора определяет положение **П2** и значение $I_{бп}$ и $U_{бэп}$. Расчет делителя напряжения $R1$ и $R2$ производят задавшись значениями $I_{бп}$ и $U_{бэп}$.

Режимы работы усилительных каскадов

В зависимости от положения рабочей точки **П** в режиме покоя на характеристиках транзисторов и величины входного сигнала различают три основных режима работы усилительных каскадов (или класса усиления): А, В, С. Они отличаются нелинейными искажениями и КПД.

Режим А характеризуется тем, что рабочая точка **П** в режиме покоя находится на линейном участке входной и передаточной характеристик транзистора, а величина входного сигнала обеспечивает работу только на линейном участке. В этом случае нелинейные искажения усиленного напряжения будут минимальными, например, при подаче на вход

усилительного каскада синусоидального напряжения форма выходного напряжения будет практически синусоидальной. Режим А широко применяется в усилителях напряжения. Его недостаток - низкий КПД, который определяется отношением выходной мощности к мощности, потребляемой усилителем от источника питания $P_{\Pi} = U_{\text{кп}} I_{\text{кп}}$. Теоретический КПД равен 0,5; реальный - редко превышает 0,35. Режим усиления класса А применяется в каскадах предварительного усиления.

В режиме В рабочую точку Π выбирают в начале передаточной характеристики транзистора, при $I_6 = 0$. Эту точку называют точкой отсечки. Переменные составляющие тока и напряжения $u_{\text{вых}}$ транзистора возникают лишь в положительные полупериоды входного напряжения. Выходное напряжение имеет форму полусинусоиды, т.е. нелинейные искажения очень большие. Режим В используется в двухтактных усилителях мощности, характеризуется более высоким КПД (0,6 ... 0,7).

Иногда используют режим работы, промежуточный между режимами А и В. Его называют режимом АВ. Рабочая точка покоя при этом находится между положениями рабочей точки в режимах А и В, КПД больше, чем в режиме А, а нелинейные искажения меньше, чем в режиме В.

В режиме С рабочая точка покоя находится за точкой отсечки при отрицательном смещении на базе транзистора, и ток в транзисторе возникает только в течение некоторой части положительного полупериода входного напряжения. Каскад имеет большие искажения усиливаемого напряжения, но высокий КПД, приближающийся к 1. Режим С используют в избирательных усилителях, автогенераторах, в выходных каскадах большой мощности (свыше 100 Вт), предназначенных для поддержания незатухающих колебаний в резонансных контурах.

ТЕМА 12. УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ

Усилительные каскады, обеспечивающие получение максимальной мощности в нагрузочном устройстве, называются усилителями мощности

Особенности и классификация усилителей мощности

Усилители мощности (УМ) классифицируются по следующим признакам:

По элементной базе:

- УМ на биполярных транзисторах, включенных по схеме ОЭ, ОК, ОБ;
- УМ на полевых транзисторах, включенных по схеме ОИ, ОС.

По используемому классу усиления:

- одноктактные (используют режим А);
- двухтактные (используют режим В или АВ).

По способу подключения нагрузки:

- трансформаторные;
- бестрансформаторные: с двумя источниками питания и с одним источником питания.

Основные параметры УМ:

- 1) коэффициент усиления по мощности K_p ;
- 2) выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$, для получения максимальной мощности в нагрузочном устройстве $R_{\text{вых}} = R_{\text{н}}$;
- 3) КПД (зависит от класса усиления).

Расчет основных величин, характеризующих показатели работы УМ, проводят обычно графоаналитическим методом, с помощью характеристик транзистора. В УМ нашли применение три класса усиления А, АВ, В, отличающиеся положением точки покоя на линии нагрузки. На рисунке 12.1 приведен пример коллекторных характеристик транзистора с ОЭ, на которые нанесены рабочие точки в режимах А и В.

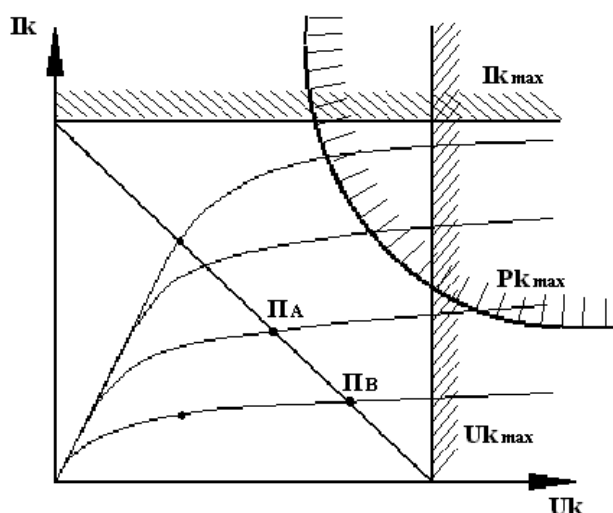


Рисунок 12.1 Для расчета параметров УМ

Т.к. чаще всего в УМ используют УК с общим эмиттером, то на семейство коллекторных характеристик можно нанести линии, соответствующие

предельными режимами работы, которые, в свою очередь, определяются предельными эксплуатационными величинами (рис. 12.1):

- максимальная мощность $P_{\max} = P_{\kappa \max}$;
- максимальное напряжение $U_{\kappa \max}$;
- максимальный ток коллектора $I_{\kappa \max}$.

Площадь треугольника MQN, образованного линией нагрузки и линиями, параллельными осям координат и проведенными из точек M и N, будет пропорциональна мощности P_{\max} , которую можно получить от транзистора в заданных условиях.

Коэффициент усиления по мощности находят по формуле:

$$K_p = P_{\kappa} / P_{\text{б}},$$

где $P_{\text{б}} = 0,5 U_{\text{бт}} I_{\text{бт}}$, а $P_{\kappa} = 0,5 U_{\max} I_{\kappa \max}$.

Если в результате расчета окажется, что получаемая в нагрузочном резисторе мощность меньше требуемой, то необходимо использовать более мощный транзистор.

Однотактный трансформаторный усилитель мощности

Однотактный УМ используется для получения небольших мощностей (рис. 12.2).

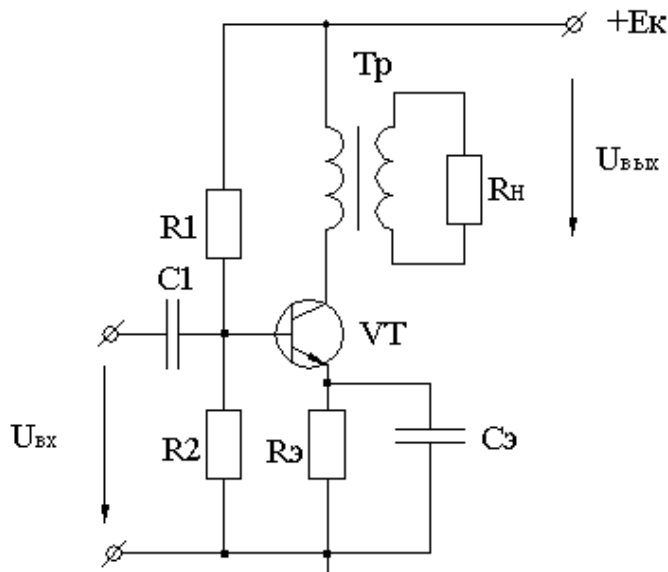


Рисунок 12.2 Однотактный трансформаторный УМ

Назначение элементов

1) понижающий трансформатор Tr ставят для согласования сопротивлений $R_{\text{н}}$ и $R_{\text{вых}}$ усилителя мощности с коэффициентом $n = w_1/w_2 = \sqrt{R_{\text{блх}}/R_{\text{н}}}$, где w_1 и w_2 - число витков первичной и вторичной обмоток. Это значит, что при определенном n можно добиться равенства $R_{\text{вых}} = R_{\text{н}}$, т.е. выполнить условие получения P_{\max} в нагрузочном устройстве;

2) делитель $R1/R2$ фиксирует по постоянному току потенциал базы;

3) сопротивление R_3 и конденсатор C_3 обеспечивают эмиттерную температурную стабилизацию;

4) разделительный конденсатор $C1$, который не пропускает постоянную составляющую тока, т.е. исключает шунтирование входной цепи каскада цепью источника питания по постоянному току.

Однотактный УМ работает в режиме усиления класса А и усиление входного сигнала происходит за один такт работы транзистора.

Двухтактный трансформаторный усилитель мощности

Двухтактный УМ состоит из двух симметричных «плеч» (рис. 12.3). Транзисторы $VT1$ и $VT2$, которые подбирают с максимально близкими характеристиками, работают в одинаковом режиме. Единственным отличием в работе «плеч» УМ является противофазность токов и напряжений в цепях баз транзисторов.

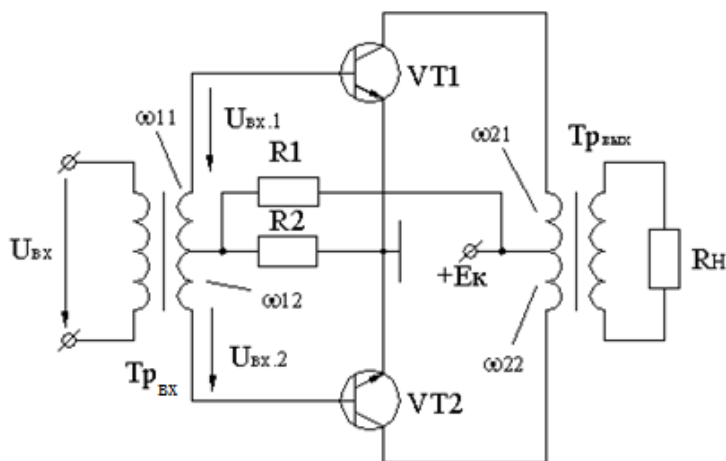


Рисунок 12.3 Двухтактный трансформаторный УМ

Назначение элементов двухтактного УМ аналогично назначению соответствующих элементов однократного УМ с учетом того, что они обслуживают два транзистора. Входной трансформатор $Tr_{вх}$ обеспечивает получение двух одинаковых по модулю, но противофазных напряжений $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$. Выходной трансформатор $Tr_{вых}$ суммирует переменные выходные тока и напряжения транзисторов. К вторичной обмотке $Tr_{вых}$ подключен нагрузочный резистор. Преимущества двухтактных усилителей наиболее ощутимы при использовании режима В.

При подаче входного сигнала, начинающегося с положительной полуволны, на вторичной обмотке w_{11} за счет самоиндукции $Tr_{вх}$ действует отрицательная полуволна относительно общей точки обмоток, а на вторичной обмотке w_{12} действует положительная полуволна. В результате $VT2$ остается закрытым, а $VT1$ открывается и через него течет коллекторный ток $i_{к1}$. В обмотке w_{21} $Tr_{вых}$ создается напряжение U_{21} , на нагрузке опять же за счет самоиндукции действует положительная полуволна.

При поступлении на вход каскада отрицательной полуволны напряжения, полярность напряжений на вторичных обмотках $Tr_{вх}$ изменяется на обратную. Теперь

закрытым остается транзистор $VT1$, а в усилении сигнала будет участвовать $VT2$. На обмотке w_{22} $Tr_{\text{вых}}$ от протекания i_{k2} от $VT2$ создается напряжение той же величины, которое будет трансформироваться в нагрузочную обмотку w_n с обратной полярностью. На нагрузке получим отрицательную полуволну напряжения.

Таким образом, процесс усиления входного сигнала осуществляется в два такта работы схемы. Первый такт сопровождается усилением одной полуволны с участием одного транзистора, а второй такт – усилением другой полуволны с участием другого транзистора [3, 14, 15].

Бестрансформаторные усилители мощности

Двухтактные каскады усиления мощности выполняют и без использования трансформаторов, что обусловлено необходимостью уменьшения массы, габаритов и стоимости УМ.

Собирают такой УМ из транзисторов разных типов (рис. 12.4), где транзистор $VT1$ -типа $p-n-p$, а транзистор $VT2$ -типа $n-p-n$.

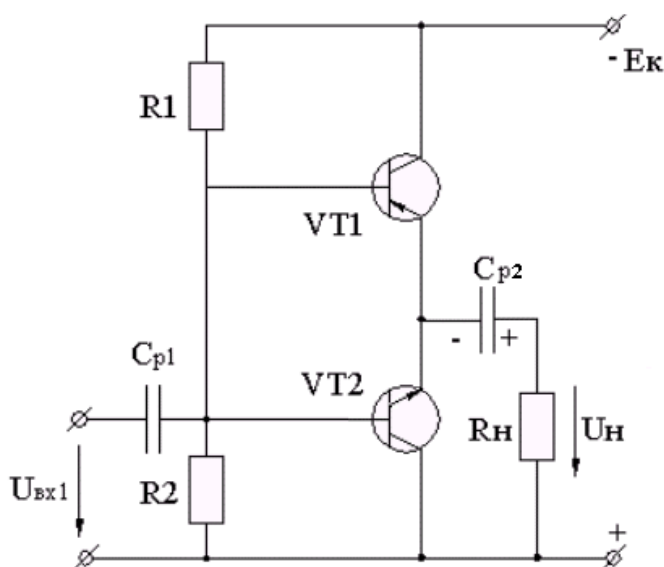


Рисунок 12.4 Бестрансформаторный УМ

Конденсатор C_{p1} разделяет по постоянному току источник сигнала и входную цепь усилителя мощности. Конденсатор C_{p2} разделяется по току нагрузочный резистор и эмиттерные цепи транзисторов. На базы транзисторов действует одно и то же переменное напряжение $U_{вх}$. Однако, в силу различной структуры транзисторов токи в цепях противофазные. Нагрузочный резистор подключен к общей точке транзисторов, поэтому переменные токи в нем имеют одинаковое направление, а результирующий ток в два раза превышает переменный ток одного транзистора.

Существуют схемы бестрансформаторных усилителей мощности, где на входе используются два противофазных сигнала, которые создаются с помощью предвыходного фазоинверсного каскада. Эти схемы различаются двумя способами подключения нагрузки к выходу каскада и, соответственно, двумя способами осуществления питания схемы [1].

При первом способе каскад питают от двух источников $E_{к1}$ и $E_{к2}$, имеющих общую точку, а нагрузку подключают между точкой соединения эмиттера и коллектора транзисторов и общей точкой источников питания (рис. 12.5).

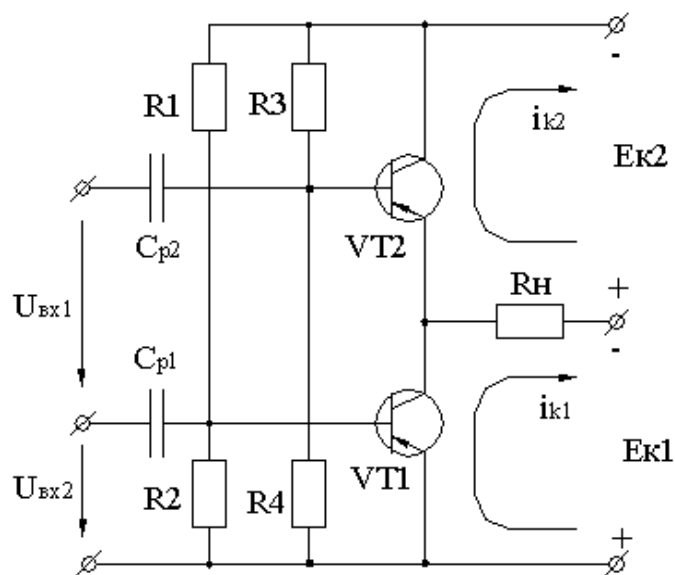


Рисунок 12.5 Бестрансформаторный УМ с двумя источниками питания

При втором способе питание каскада осуществляется от одного общего источника, а нагрузку подключают через конденсатор большой емкости (рис. 12.6) [2].

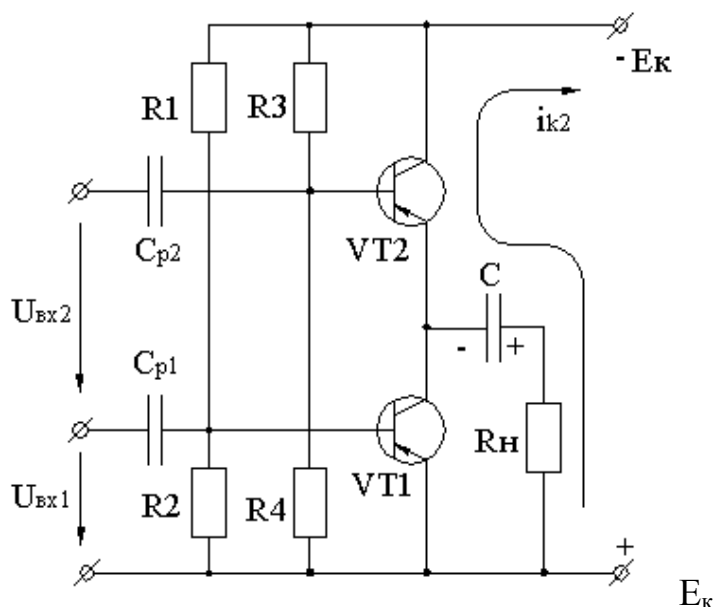


Рисунок 12.6 Бестрансформаторный УМ с одним источником питания

В отсутствии сигналов на входе $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$ конденсатор C заряжен до напряжения $0,5E_K$. В такте работы транзистора $VT1$, $VT2$ закрыт и конденсатор выполняет функцию источника питания нагрузки. В такте работы $VT2$ ток нагрузки протекает через источник питания E_K . При этом ток i_{k2} , протекающий

через конденсатор C , наполняет его энергией, компенсируя тем самым отданную в нагрузку энергию в предыдущем такте. $VT1$ и $VT2$ в схемах с двумя противофазными входными сигналами имеют различные способы включения: $VT1$ -по схеме ОЭ, $VT2$ - по схеме ОК, а это значит, что коэффициенты усиления по напряжению различны и должны быть приняты меры по выравниванию коэффициентов усиления для обеих полуволн входного сигнала. Эту задачу решают обеспечением соответствующих коэффициентов усиления по двум входам фазоинверсного каскада.

ТЕМА 13. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Операционным усилителем (ОУ) называют дифференциальный усилитель постоянного тока, обладающий большим коэффициентом усиления $K_{\text{ОУ}} = 10^3 - 10^6$. ОУ предназначен для выполнения различных операций над аналоговыми сигналами: усиление и ослабление, сложение и вычитание, интегрирование и дифференцирование, сравнение и т.д. Все эти операции ОУ выполняет с помощью цепей обратной связи, в состав которых могут входить сопротивления, емкости, индуктивности и др.

ОУ имеет дифференциальный вход реализованный через два вывода инвертирующий (И) и неинвертирующий (Н), один общий выход, питание обеспечивается двухполярным источником $E_{\text{п}}$ (рис. 13.1).

Идеальный ОУ обладает следующими свойствами:

- коэффициент передачи ОУ без обратной связи равен бесконечности;
- входной ток равен нулю;
- напряжение смещения и ток смещения нуля на входе ОУ равны нулю;
- входное сопротивление ОУ равно бесконечности;
- выходное сопротивление ОУ равно нулю

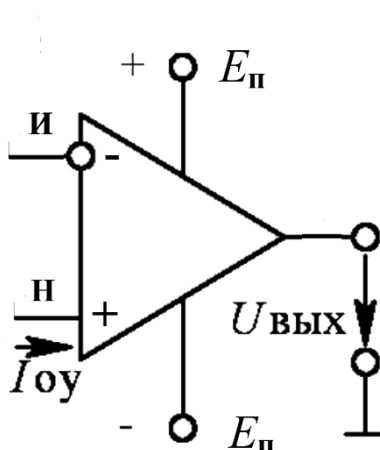


Рисунок 13.1 Условное изображение ОУ

Структурная схема ОУ представлена на рисунке 13.2.



Рисунок 13.2 Структурная схема ОУ

Основу ОУ составляет дифференциальный каскад [4], который используется в качестве входного каскада усилителя.

Выходным каскадом ОУ обычно является эмиттерный повторитель (ЭП), который обеспечивает нагрузочную способность всей схемы. Т.к. K_U (ЭП) = 1, то необходимое значение K_U ОУ обеспечивается подключением дополнительных каскадов между дифференциальным каскадом и ЭП. В зависимости от количества используемых каскадов, ОУ подразделяются на двух- и трехкаскадные. В трехкаскадных ОУ входной дифференциальный каскад обычно выполняют с резистивными нагрузками, а в 2-х каскадных - с динамическими нагрузками.

Характеристики ОУ

Важнейшими характеристиками ОУ являются его амплитудные характеристики и амплитудно-частотные характеристики.

Амплитудная характеристика отражает две зависимости $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ по инвертирующему и неинвертирующему входам. Эти характеристики снимаются при подаче сигнала на один из входов при нулевом сигнале на другом (рисунок 13.3). На характеристике горизонтальные участки кривых соответствуют нелинейному режиму работы ОУ. При изменении напряжения входного сигнала на этих участках $U_{\text{вых.}}$ остается без изменения и определяется $U_{\text{вых. max}}^+$ и $U_{\text{вых. max}}^-$, которые близки к напряжению источников питания $E_{\text{п}}$.

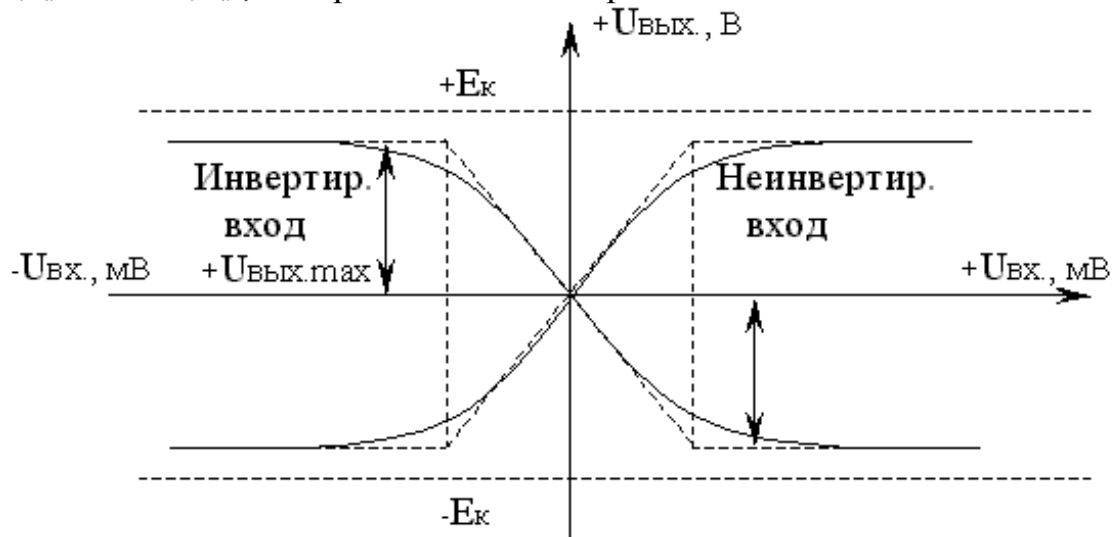


Рисунок 13.3 Амплитудные характеристики ОУ

Наклонному участку кривых соответствует пропорциональная зависимость напряжения $U_{\text{вых.}}$ от напряжения $U_{\text{вх}}$ (линейный режим). Угол наклона определяется коэффициентом усиления $K_{UOY} = \Delta U_{\text{вых.}} / \Delta U_{\text{вх.}}$. Значение K_{UOY} зависит от типа ОУ и величины отрицательной обратной связи усилителя, может принимать значение от нескольких сотен до сотен тысяч.

Когда кривые проходят через 0, это соответствует напряжениям $U_{\text{вх.}} = 0$ и $U_{\text{вых.}} = 0$. Такое состояние называется балансом ОУ. Однако для реальных ОУ условие баланса обычно не выполняется (наблюдается разбаланс). При напряжении $U_{\text{вх.}} = 0$, $U_{\text{вых.}}$ может быть чуть больше или чуть меньше нуля. Напряжение, при котором $U_{\text{вых.}} = 0$, называется входным напряжением смещения нуля $U_{\text{см0}}$. Оно определяет значение напряжения, которое необходимо

подать на вход ОУ для создания баланса. Основной причиной разбаланса является разброс параметров дифференциального усилительного каскада (обычно транзисторов).

Другой важной характеристикой ОУ является амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) (рис. 13.4).

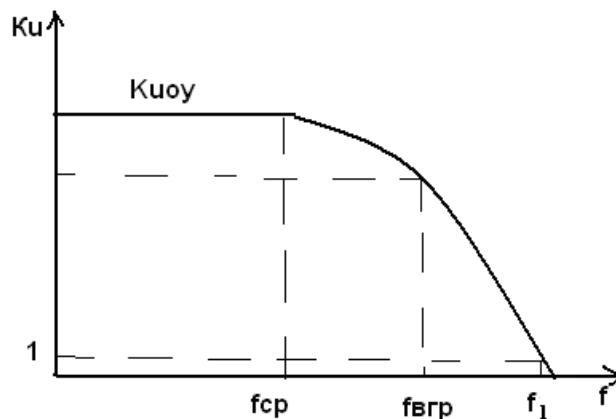


Рисунок 13.4 Амплитудно-частотная характеристика операционного усилителя

Параметры ОУ

Входные параметры:

- а) входное сопротивление $R_{вх}$;
- б) входные токи смещения;
- в) разность и дрейф токов смещения.

Выходные параметры:

- а) выходное сопротивление $R_{вых}$;
- б) максимальное выходное напряжение $U_{\max \text{ вых.}}$;
- в) выходной ток $I_{вых.}$

Энергетические параметры:

- а) максимальные потребляемые токи от обоих источников питания;
- б) суммарная потребляемая мощность.

Частотные параметры (определяют по АЧХ ОУ, рис. 12.4):

- а) частота среза $f_{ср}$, начиная с которой АЧХ имеет спадающий характер.
- б) частота единичного усилителя f_1 , при которой $K_{УОУ} = 1$.
- в) граничная частота $f_{гр}$, которой соответствует снижение коэффициента усиления ОУ в $\sqrt{2}$ раз.

Скоростные (динамические) параметры:

- а) скорость нарастания выходного напряжения (скорость отклика);
- б) время установления выходного напряжения.

Большинство ОУ изготавливается в виде интегральных микросхем по полупроводниковой технологии (серии К140, К153, К740 и др.), некоторые – по гибридной (серии 284, 286).

Примеры интегральных ОУ: К140УД21, К140УД24 (высокоточные); К157УД1, К1408УД1 (мощные и высоковольтные); К140УД10, К544УД2 (быстродействующие).

Аналоговая схемотехника на основе операционных усилителей позволяет создавать различные вычислительные схемы. На основе операционных усилителей могут быть реализованы операции сложения и вычитания, дифференцирования и интегрирования. Недостатком этих вычислительных схем является невысокая точность вычислений. Однако этой точности в целом ряде случаев бывает вполне достаточно.

Вычислительные схемы на ОУ

Инвертирующий усилитель (рис. 13.5).

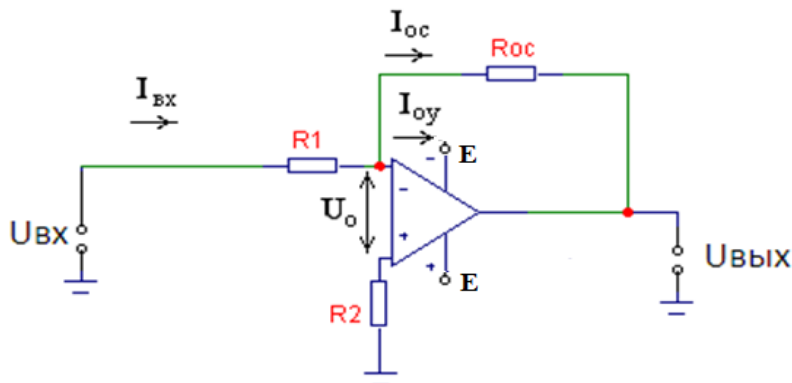


Рисунок 13.5 Инвертирующий усилитель

Инвертирующий усилитель изменяет знак выходного сигнала относительно входного и создается введением по инвертирующему входу ОУ с помощью резистора R_{oc} отрицательной обратной связи по напряжению. Неинвертирующий вход заземляется. На инвертирующий вход через резистор $R1$ подается входной сигнал. Если принять значение $R_{вхОУ} = \infty$ и входной ток ОУ $I_{OУ} = 0$, то ток $I_{вх} = I_{oc}$, и тогда $U_{вх} - U_0/R1 = U_{вых} - U_0/R_{oc}$.

При $K_{OУ} \rightarrow \infty$ напряжение на входе ОУ $U_0 = U_{вых}/K_{OУ} \rightarrow 0$, и тогда

$$U_{вх}/R1 = -U_{вых}/R_{oc}.$$

Следовательно, коэффициент усиления по напряжению инвертирующего усилителя с параллельной обратной связью $K_{UI} = U_{вых}/U_{вх} = -R_{oc}/R1$, т.е. определяется параметрами только пассивной части схемы.

Неинвертирующий усилитель (рис. 13.6).

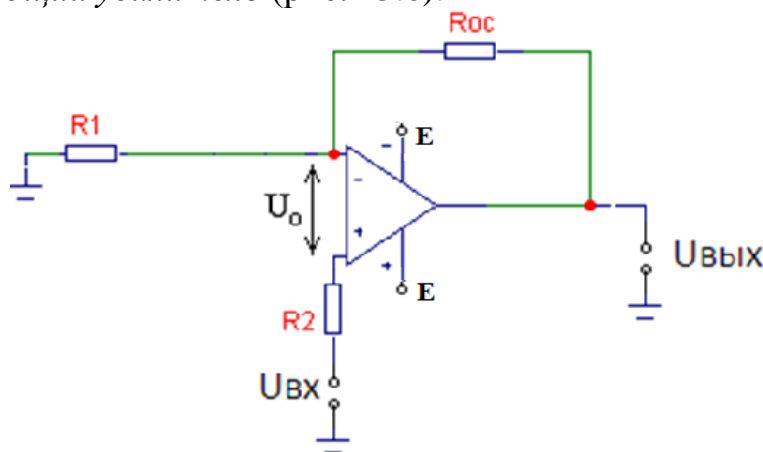


Рисунок 13.6 Неинвертирующий усилитель

Неинвертирующий усилитель содержит последовательную отрицательную обратную связь по напряжению и не изменяет знак выходного сигнала относительно входного. Входной сигнал подается на неинвертирующий вход ОУ. Полагая, что напряжение $U_0 = 0$ и ток $I_{OY} = 0$ получим

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \cdot (R_1 + R_{\text{OC}}) / R_1.$$

Тогда коэффициент усиления неинвертирующего усилителя $K_{\text{УН}} = 1 + R_{\text{OC}} / R_1$. $R_{\text{ВХ}}$ неинвертирующего усилителя велико, а $R_{\text{ВЫХ}} \rightarrow 0$.

Неинвертирующий и инвертирующий усилители широко используют в качестве высокостабильных усилителей различного назначения [5].

Сумматоры

Для суммирования нескольких напряжений используют схемы, построенные на основе операционных усилителей в инвертирующем и неинвертирующем включении, которые называют сумматорами.

Сумматоры делятся на инвертирующие и неинвертирующие. Неинвертирующий сумматор (рис. 13.7, а) реализуется на основе схемы неинвертирующего усилителя путем добавления к входу параллельных ветвей, число которых равно количеству сигналов, предназначенных для сложения. Входные напряжения через резисторы R подаются на неинвертирующий вход усилителя, который в этой схеме является суммирующей точкой.

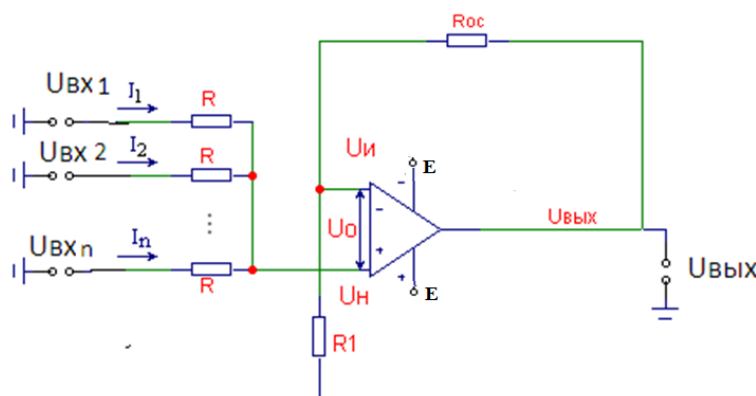


Рисунок 13.7, а. Неинвертирующий сумматор

При напряжении $U_0 = 0$, $U_{\text{Н}} = U_{\text{и}} = [R_1 / (R_1 + R_{\text{OC}})] U_{\text{ВЫХ}}$.

Тогда $U_1 - U_{\text{Н}} / R + U_2 - U_{\text{Н}} / R + \dots + U_n - U_{\text{Н}} / R = 0$.

Исходя из этого, для неинвертирующего усилителя выходное напряжение будет равно

$$U_{\text{ВЫХ}} = [(R_1 + R_{\text{OC}}) / n \cdot R_1] (U_1 + U_2 + \dots + U_n).$$

Инвертирующий сумматор (рис. 13.7, б) выполняется по типу инвертирующего усилителя с числом параллельных ветвей на входе, число которых равно количеству сигналов, предназначенных для сложения.

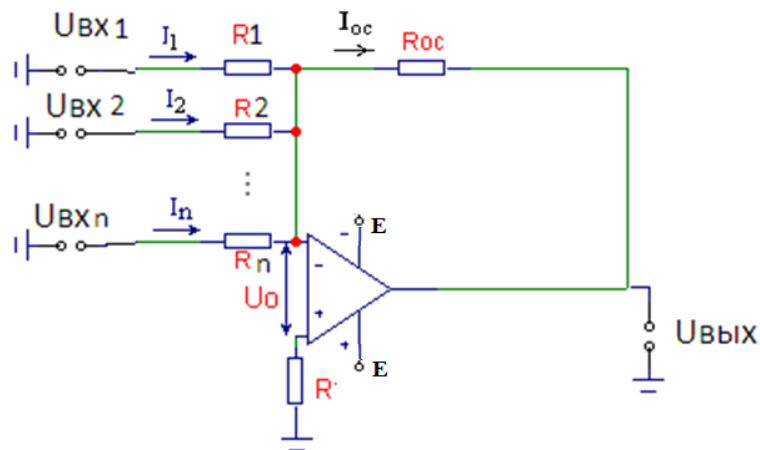


Рисунок 13.7, б. Инвертирующий сумматор

Для инвертирующего сумматора сопротивления резисторов будут равны

$$R_{oc} = R_1 = R_2 = \dots = R_n.$$

При входном токе $I_{BX OY}=0$ получаем

$$I_{oc} = I_1 + I_2 + \dots + I_n.$$

Тогда выходное напряжение будет равно

$$U_{ВЫХ} = - (R_{oc}/R_1) U_1 + (R_{oc}/R_2) U_2 + \dots + (R_{oc}/R_n) U_n.$$

Вычитатель (рис. 13.8)

Для вычитания входных напряжений используется схема вычитателя на ОУ. Если $R_1 = R_2$ и $R_{oc} = R$, то $U_{ВЫХ} = R_{oc}/R_1 (U_{BX2} - U_{BX1})$

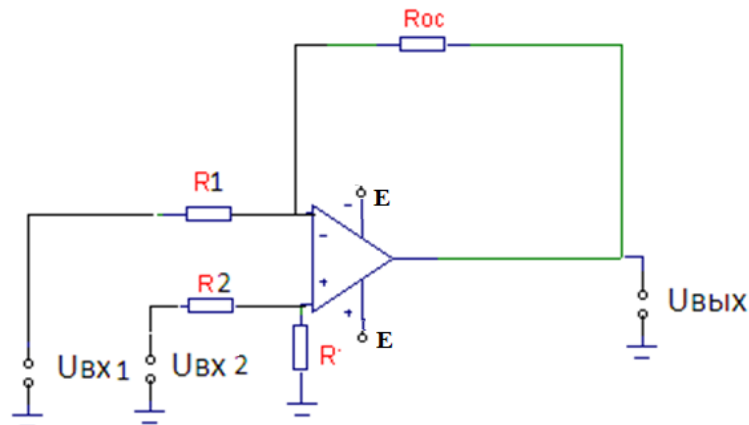


Рисунок 13.8 Вычитатель

Интегратор (рис. 13.9)

Интегратор создают заменой в схеме инвертирующего усилителя резистора R_{oc} конденсатором $C1$.

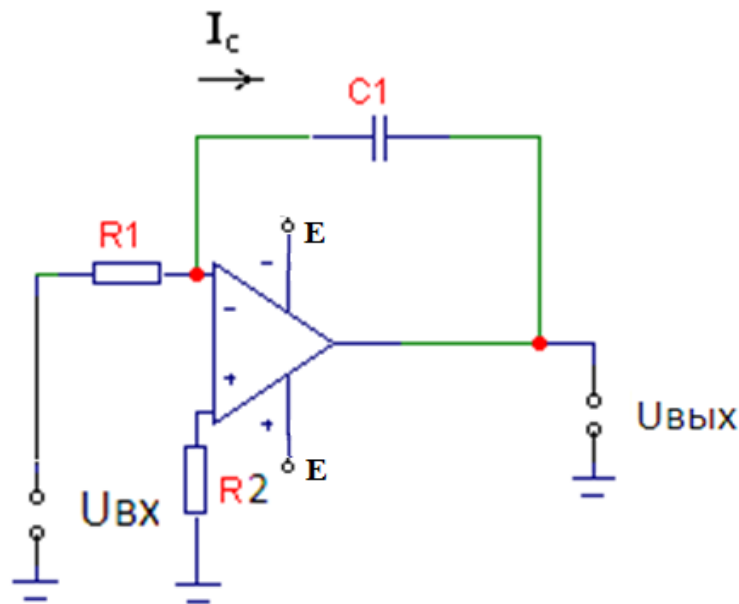


Рисунок 13.9 Интегратор

Выходное напряжение интегратора пропорционально интегралу от входного сигнала. Так как ток $I_{вх} = I_c$ или $U_{вх}/R1 = -C1(dU_{вых}/dt)$, то выходное напряжение равно

$$U_{вых} = -1/R1C1 \int U_{вх} dt + U_{вых0},$$

где $U_{вых0}$ - выходное напряжение при $t = 0$.

Если $t = 0$ и $U_{вых0} = 0$, то тогда $U_{вых} = -1/\tau \int U_{вх} dt$,

где $\tau = R1C1$ - постоянная времени.

Временные зависимости $U_{вх}$ и $U_{вых}$ показаны на рис. 13.10.

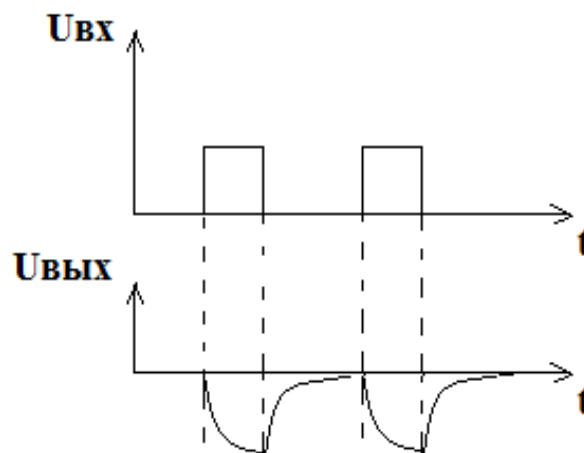


Рисунок 13.10 Зависимости $U_{вх}$ и $U_{вых}$ от времени t для интегратора.

Дифференциатор (рис. 13.11)

Если в схеме интегратора поменять местами сопротивление $R1$ и конденсатор $C1$, то получим схему дифференциатора.

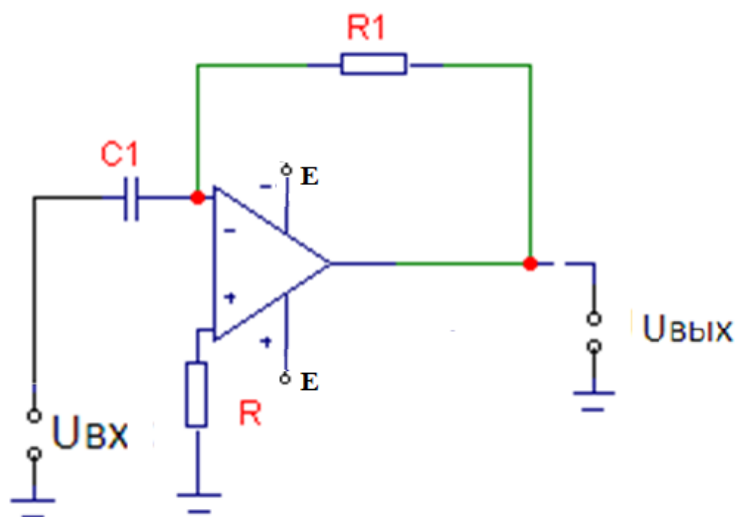


Рисунок 13.11 Дифференциатор

Входной сигнал подается на инвертирующий вход ОУ и формула выполняемой операции определяется выражением

$$U_{\text{ВЫХ}} = -R1C1 (dU_{\text{ВХ}}/dt) = -\tau (dU_{\text{ВХ}}/dt).$$

Временные зависимости $U_{\text{ВХ}}$ и $U_{\text{ВЫХ}}$ показаны на рисунке 13.12.

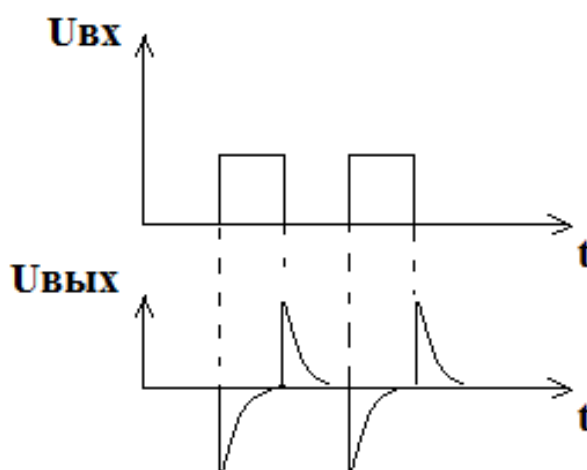


Рисунок 13.12 Зависимости $U_{\text{ВХ}}$ и $U_{\text{ВЫХ}}$ от времени t для дифференциатора

Компаратор на ОУ (рис. 13.13)

Компараторы играют очень важную роль при аналого-цифровом преобразовании. Компаратором называют устройство, предназначенное для сравнения изменяющегося аналогового входного сигнала с опорным напряжением. При равенстве входного напряжения с опорным выходное напряжение равно нулю. При $\Delta U_{\text{ВХ}} = U_{\text{оп}} - U_{\text{ВХ}} > 0$ напряжение на выходе ОУ будет равно $u_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ.м}}$, если же $\Delta U_{\text{ВХ}} = U_{\text{оп}} - U_{\text{ВХ}} < 0$, то $u_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{ВЫХ.м}}$.

Уровень входного напряжения компаратора ограничивается допустимым синфазным входным напряжением. Принцип работы устройства поясняется временными диаграммами для $u_{\text{ВХ}}$ и $u_{\text{ВЫХ}}$ (рис.13.13, в). Обратные связи для этого компаратора не предусмотрены ни по одному из входов.

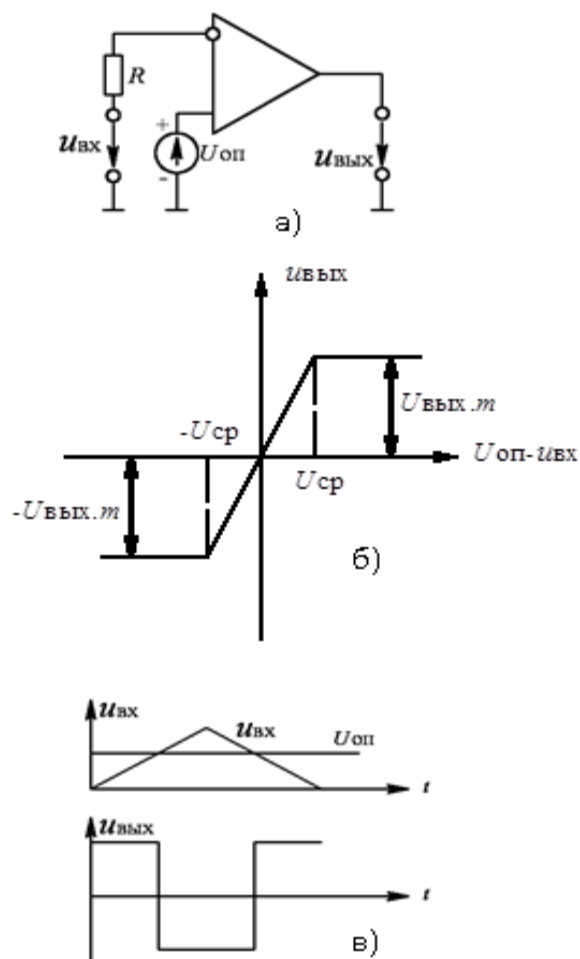


Рисунок 13.13 Компаратор на ОУ

Компараторы выпускаются в интегральном исполнении, а также являются составной частью микросхем аналогово-цифровых преобразователей (АЦП).

Модуль 3 Цифровые устройства

ТЕМА 14. ИМПУЛЬСНЫЙ СИГНАЛ

Импульсная и цифровая техника использует импульсный режим работы, при котором кратковременное воздействие сигнала чередуется с паузой.

На базе импульсной техники выполняются системы управления и регулирования, устройства измерения, на ней основана цифровая вычислительная техника.

Преобладающее применение импульсных систем обусловлено:

- значительно меньшим потреблением тока;
- более высокой точностью;
- меньшей зависимостью от температуры;
- большой помехоустойчивостью;
- большей надежностью, меньшими габаритами и массой.

Способы представления информации

Универсальным способом отображения информации при ее сборе, передаче, хранении и обработке является кодирование. Для представления числовой, буквенной, символьной, логической и других информации в цифровой технике и микропроцессорных системах применяются двоичные позиционные коды, в которых используются только два символа (0 и 1). Двоичные коды реализуются благодаря дискретному представлению электрических и других сигналов в виде импульсов или перепадов (например, рассмотренный выше сигнал прямоугольной формы имеет два фиксированных уровня напряжения: уровень высокого напряжения соответствует уровню логической «1», и уровень низкого напряжения – логического «0»). Поэтому такую информацию называют цифровой, а соответствующие системы обработки дискретными или цифровыми.

Импульсный сигнал характеризуется рядом параметров, которые можно рассмотреть на примере реального импульса напряжения прямоугольной формы (рисунок 14.1):

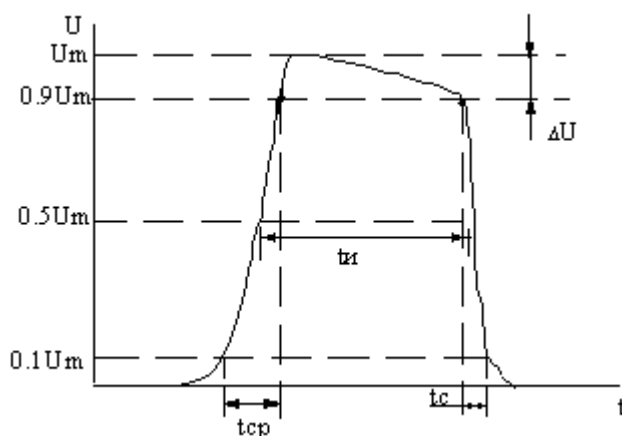


Рисунок 14.1 Параметры сигнала прямоугольной формы

Параметры импульсного сигнала:

- 1) амплитуда импульса U_m ;
- 2) длительность импульса $t_{и}$, измеряют на уровне $0,5 U_m$, иногда на уровне $0,1 U_m$ в зависимости от формы сигнала;
- 3) длительность фронта импульса $t_{ф}$ – определяется временем нарастания импульса от $0,1 U_m$ до $0,9 U_m$;
- 4) длительность среза импульса – определяется временем убывания импульса от $0,9 U_m$ до $0,1 U_m$;
- 5) спад вершины импульса ΔU .

Параметрами последовательности импульсов являются (рисунок 14.2):

- 1) период повторения T ;
- 2) длительность паузы $t_{п} = T - t_{и}$ – интервал времени между окончанием одного и началом другого импульса;
- 3) длительность импульса $t_{и}$;
- 4) частота повторения $f = 1/T$;
- 5) коэффициент заполнения γ , который характеризуется отношением длительности импульса к периоду их следования $\gamma = t_{и}/T$;
- 6) скважность $q = T/t_{и} = 1/\gamma$.

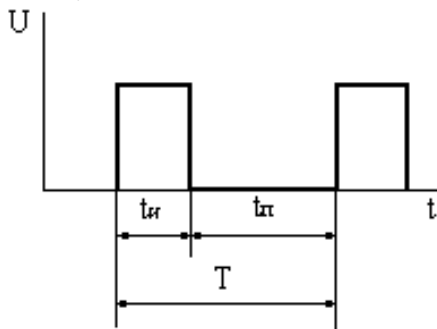


Рисунок 14.2 Параметры последовательности импульсных сигналов

Сигнал прямоугольной формы имеет два фиксированных уровня напряжения: уровень высокого напряжения соответствует уровню логической «1», и уровень низкого напряжения – логического «0». На таком виде сигналов основана работа цифровых вычислительных устройств.

Простейшие формирователи импульсных сигналов

Транзисторные ключи

В состав многих импульсных устройств входят электронные ключи, основу которых составляет активный элемент (полупроводниковый диод, транзистор, тиристор), работающий в режиме ключа. Ключевой режим характеризуется двумя состояниями ключа: «Включено», «Выключено».

В реальных ключах токи и уровни $U_{вых}$, зависят от типа и параметров активных элементов. Ключи могут собираться на диодах и на транзисторах.

Ключевая схема на биполярном транзисторе показана на рисунке 14.3.

Транзистор выполняет функцию ключа в последовательной цепи с резистором R_k и источником питания E_k . Входная (управляющая) цепь отделена от выходной (управляемой) цепи. Состояние ключа, т.е. открыт он или закрыт, определяется по выходной характеристике транзистора (рис. 14.4).

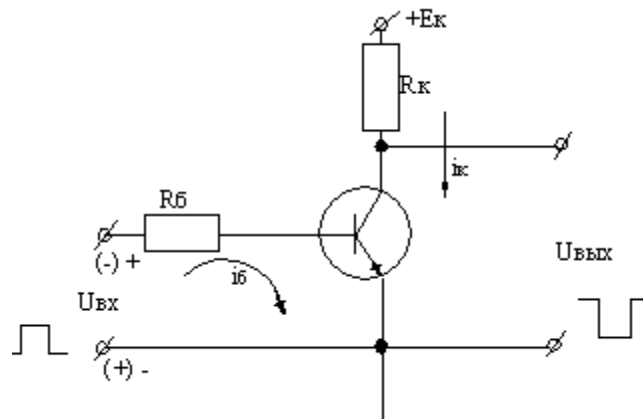


Рисунок 14.3 Ключевая схема на биполярном транзисторе

Первое состояние определяется точка А1 на линии нагрузки, которая строится так же, как и для усилительного каскада.

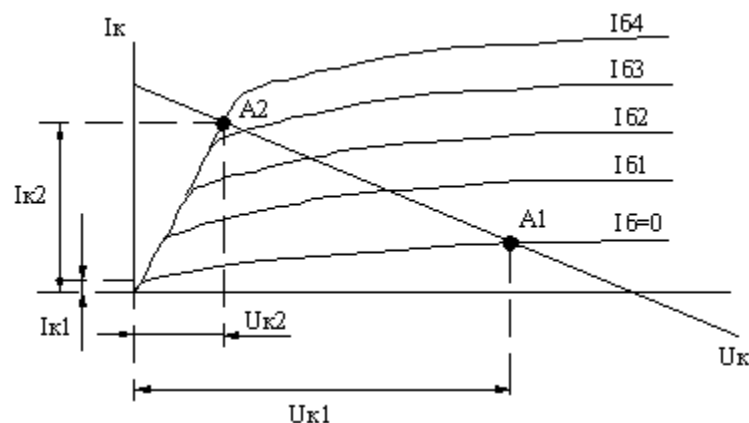


Рисунок 14.4 Выходная характеристика транзистора

Это состояние называют режимом отсечки, который осуществляется подачей на его вход напряжения отрицательной полярности, т.е. при отрицательных потенциалах базы. При токе $I_b = 0$, транзистор закрыт, коллекторный ток $I_{к1}$ равен начальному коллекторному току, а напряжение $U_k = U_{к1} \approx E_k$.

Второе состояние определяется точка А2 и называется режимом насыщения. Он реализуется при положительных потенциалах базы. При этом ток базы определяется сопротивлением резистора R_6 и ток $I_2 = U_{вх}/R_6$, т.к. сопротивление открытого эмиттерного перехода мало, потому что транзистор открыт. Коллекторный переход так же открыт, ток $I_{к2} \approx E_k/R_k$, $U_{к2} \approx 0$. Т.е. повышению $U_{вх}$ (потенциала базы) соответствует понижение $U_{вых}$ (потенциала коллектора), и наоборот. Такой ключ называют инвертирующим. Электронные ключи используют в устройствах формирования импульсов.

Ключ на полевом транзисторе

Для реализации ключевого режима полевого транзистора в цифровых схемах применяются МОП – транзисторы с индуцированным каналом.

Для ключей на полевых транзисторах характерно: малая мощность источника управляющего сигнала; высокое сопротивление в непроводящем состоянии; малое напряжение на ключе в проводящем состоянии; электрическая развязка между цепью управления и нагрузки.

Очевидно, что при нулевом входном сигнале полевой транзистор (рис.14.5) заперт и $U_{си} = E_c$. Если напряжение $U_{вх}$ больше порогового напряжения $U_{зи.порог}$ транзистора, то он открывается и напряжение $U_{си}$ уменьшается. На схеме изображена емкость нагрузки C_H , моделирующая емкость устройств, подключенных к транзисторному ключу

Напряжение на ключе в его включенном состоянии $U_{вкл}$ зависит от сопротивления стока R_c , величины входного сигнала и особенностей стоковых характеристик транзистора. Скорость изменения напряжения на выходе определяется сопротивлением R_c , емкостью C_H и частотными свойствами транзистора

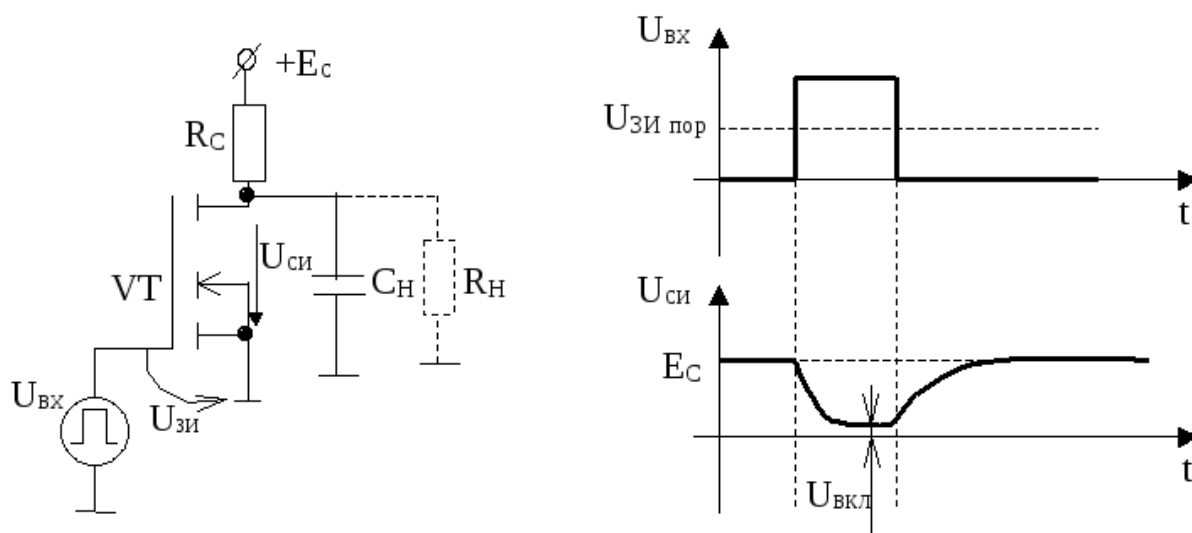


Рисунок 14.5 Ключевая схема на полевом транзисторе

Диодные ключи

Для ограничения сверху применяют диодные ключи или транзисторные ключи, работающие только в режиме отсечки или только в режиме насыщения. На диаграммах (рис. 14.6) показано, как происходит ограничение синусоидального напряжения с помощью параллельного диодного ключа с ненулевым уровнем включения ключа.

При положительной полярности напряжения $U_{вх}$ VD открыт (ключ замкнут), напряжение $U_{вых} = 0$, при отрицательной полярности напряжения $U_{вх}$ VD закрыт (ключ разомкнут), $U_{вых} = U_{вх}$. Уровень ограничения равен уровню включения ключа (т. А).

Аналогично получают ограничение снизу. Для двухстороннего ограничения используют двойные ключи.

Таким образом, ограничители позволяют сформировать трапецеидальное напряжение или прямоугольное, если амплитуда напряжения $U_{вх}$ значительно больше уровня ограничения, а также сгладить вершины импульсов, искаженных помехой [3, 4].

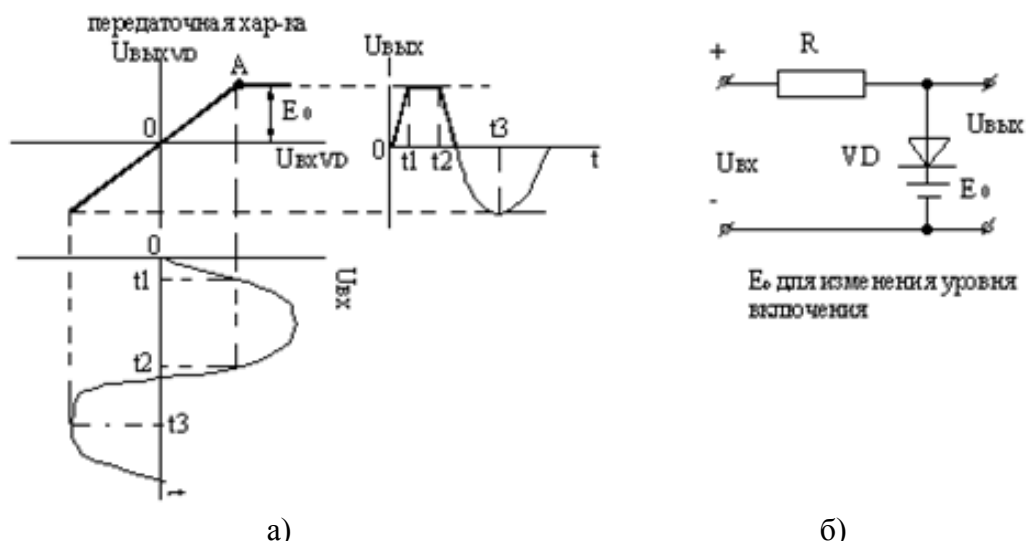


Рисунок 14.6 Диаграмма работы диодного ключа: а) временные диаграммы и передаточная характеристика диодного ключа; б) схема включения диодного ключа

Линейные цепи

Линейные цепи служат для формирования коротких импульсов. К ним относятся дифференцирующие цепи и интегрирующие цепи. Дифференцирующие цепи – это линейные четырехполусники, у которых напряжение $U_{вых}$ пропорционально производной напряжения $U_{вх}$ по времени:

$$U_{вых} = k \frac{dU_{вх}}{dt},$$

где k – коэффициент пропорциональности.

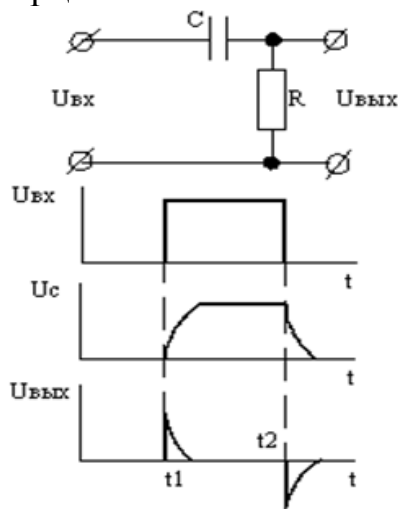


Рисунок 14.7 Дифференцирующая цепь и временные диаграммы ее работы

На входе воздействует прямоугольный импульс напряжения (рис. 14.7). Конденсатор сначала заряжается, затем какое-то время находится в покое, затем разряжается, на выходе образуются короткие импульсы.

К линейным цепям относятся интегрирующие цепи, у которых $U_{вых}$ пропорционально интегралу по времени от $U_{вх}$. При этом в схеме (рис. 14.7) C и R меняются местами.

ТЕМА 15. ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Простые и составные логические элементы.

Логические элементы (ЛЭ) выполняют простейшие логические операции над цифровой информацией и составляют основу вычислительной техники, цифровых измерительных приборов и устройств автоматики.

Цифровая информация представляется двоичными константами 1 и 0. Логические преобразования двоичных сигналов выполняются на базе элементарных операций алгебры Буля (алгебры логики).

Существуют три основные логические операции между логическими сигналами:

- конъюнкция – операция логического умножения (логическое И);
- дизъюнкция – операция логического сложения (логическое ИЛИ);
- инверсия – операция логического отрицания (логическое НЕ).

А также:

- операция И-НЕ (операция Шеффера);
- операция ИЛИ-НЕ (операция «стрелка Пирса»).

Логическая функция F выражает зависимость выходного логического состояния от входных переменных и принимает значения «0» или «1». Любую логическую функцию удобно представить в виде таблицы состояний (таблицы истинности или таблицы переходов), где записываются комбинации входных сигналов и соответствующие им функции.

ЛЭ, реализующие эти операции, называются элементами «ИЛИ», элементами «И» и элементами «НЕ» и условно обозначаются (рис. 15.1):

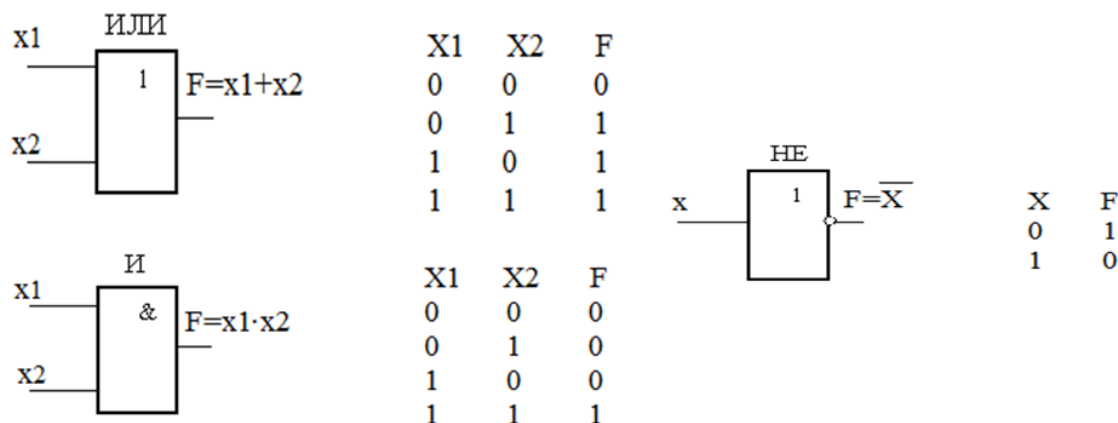


Рисунок 15.1 Условное обозначение простых ЛЭ и правила выполнения логических операций

В элементах «ИЛИ» выходной сигнал $F = 1$, если хотя бы на один из n входов подан сигнал «1». В элементах «И» $F = 1$, если одновременно на все n входов подан сигнал «1».

ЛЭ, реализующие операции Шеффера и «стрелка Пирса», называются элементами «И-НЕ», элементами «ИЛИ-НЕ» и условно обозначаются (рис. 15.2)

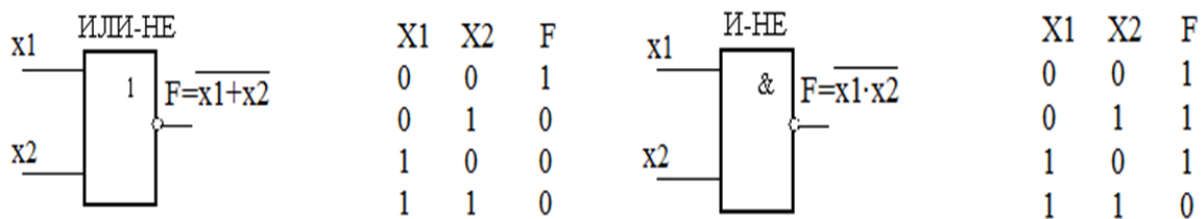


Рисунок 15.2 Условное обозначение составных ЛЭ и правила выполнения логических операций

Основные параметры логических элементов:

- функциональные возможности элемента;
- быстродействие;
- потребляемая мощность;
- помехоустойчивость.

Функциональные возможности определяются коэффициентом разветвления по выходу n и коэффициентом объединения по входу m .

Показателем быстродействия является среднее время задержки $t_{з.с.}$ прохождения сигнала через элемент.

Потребляемая мощность зависит от серии микросхемы.

Помехоустойчивость характеризует меру невосприимчивости логических элементов к изменению своих состояний под воздействием напряжения помех.

Интегральные логические элементы являются основной элементной базой для построения цифровых устройств.

В зависимости от компонентов, на которых построены логические элементы (т.е. в зависимости от того, какая логика работы лежит в основе), различают следующие типы базовых логических элементов, использующих соответствующие логики:

1. Диодно-транзисторная логика (ДТЛ);
2. Транзисторно-транзисторная логика (ТТЛ);
3. Эмиттерно-связанная логика (ЭСЛ);
4. Интегрально-инжекционная логика (И²Л);
5. Логика на комплементарных полевых транзистора (КМОП).

В 1-м типе используются диоды и биполярные транзисторы, во 2-м, 3-м и 4-м – только биполярные транзисторы, в 5-м – полевые транзисторы.

Элемент «ИЛИ» наиболее просто реализуется на диодах (рис. 15.3).

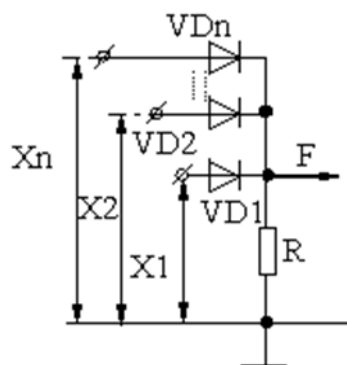


Рисунок 15.3 - Схемная реализация элемента «ИЛИ»

Значение $F = 1$ на выходе создается передачей входного сигнала вследствие отпираания одного из диодов. Остальные диоды находятся в закрытом состоянии.

Элемент «И» также реализуется на диодах (рис. 15.4).

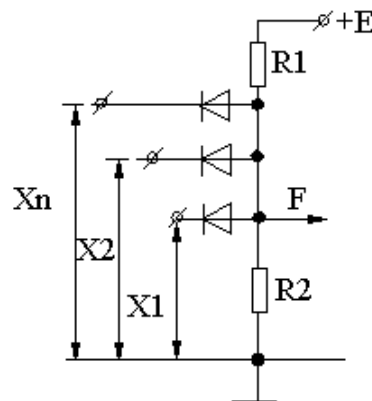


Рисунок 15.4 Схемная реализация элемента «И»

При всех входных сигналах $= 1$, на катоде диодов положительный потенциал относительно общей точки, и они закрыты. На выходе $F = 1$. При нулевом значении сигнала хотя бы на одном из входов, напряжение на выходе определяется падением напряжения на открытом диоде и близко к нулю ($F = 0$).

Элемент «НЕ» представляет собой ключевую схему на транзисторе, которую мы уже рассматривали (рис. 15.5).

Элемент «ИЛИ–НЕ» объединяет элементы «ИЛИ» и «НЕ» с очередностью проведения операций (рис. 15.6).

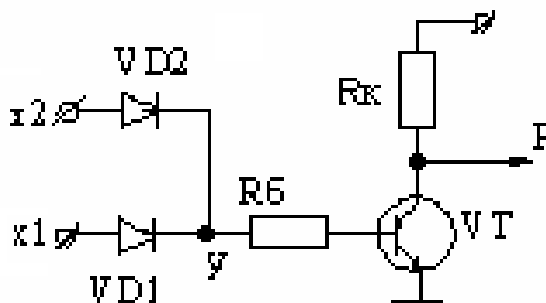


Рисунок 15.6 Схемная реализация элемента «ИЛИ-НЕ»

Входным сигналам, равным 1, соответствует $F = 0$ на выходе, а при нулевых сигналах на входе, на выходе $F = 1$.

В элементе «И–НЕ» (рис. 15.7) единичным сигналам на всех входах соответствует «0» на выходе. При «0» на одном из входов создается логическая «1» на выходе. При «1» на обоих входах диоды $VD1$, $VD2$ закрыты. В схеме образуется цепь $+E_k - R_6 - VD' - VD''$, которая обеспечивает протекание тока базы транзистора $I_6 = E_k / R_6$.

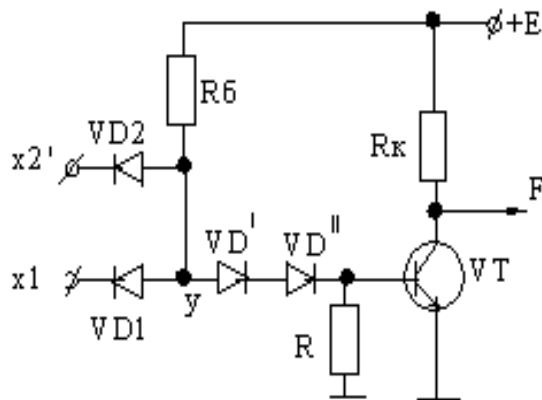


Рисунок 15.7 Схемная реализация элемента «И-НЕ»

Транзистор открыт и насыщен, $F = 0$. При логическом «0» на одном из входов (например, x_1) открывается $VD1$. Образуется цепь: $+E_k - R_6 - VD1 - x_1$. При этом цепь $VD' - VD''$ - эмиттерный переход транзистора оказывается шунтированной цепью с проводящим диодом: $I_6 = 0$, транзистор закрыт, $F = 1$.

Назначение диодов VD' , VD'' : т.к. потенциал логического «0» реально больше нуля, то при отсутствии VD' и VD'' это может привести к отпирианию транзистора. При введении VD' и VD'' напряжение между т. У и эмиттером транзистора будет приложено к диодам, а $U_{63} = 0$.

Следует отметить, что существуют комбинированные логические элементы, которые позволяют осуществлять более сложные логические операции.

Например, элемент «2И-ИЛИ-НЕ» (рис. 15.8) позволяет выполнять функцию $F = x_1 \cdot x_2 + x_3 \cdot x_4$.

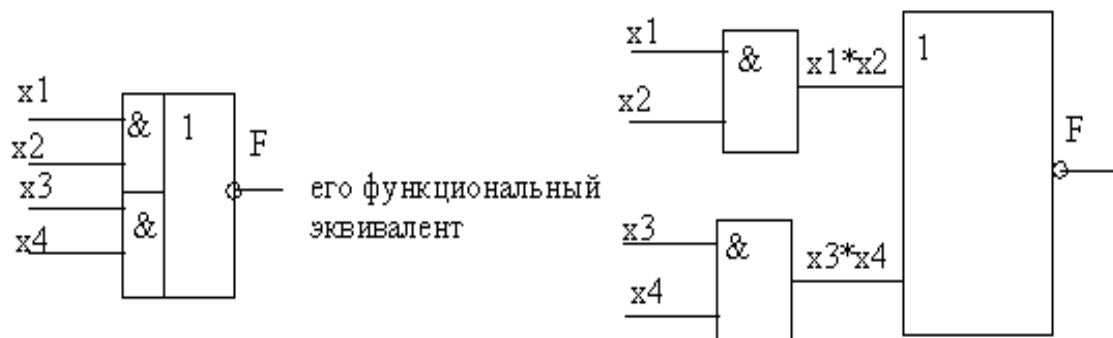


Рисунок 15.8 Условное обозначение и функциональный эквивалент элемента «2И-ИЛИ-НЕ»

Логические преобразования двоичных сигналов выполняются на базе элементарных операций алгебры логики.

ТЕМА 16. ТРИГГЕРЫ

Триггером называют устройство, обладающее двумя устойчивыми состояниями, способное скачком переходить из одного состояния в другое под воздействием внешнего управляющего сигнала. Триггер относится к базовым элементам цифровой техники.

Триггеры классифицируются по следующим признакам:

по функциональному признаку:

- а) *RS*-типа – триггеры с двумя установочными входами;
- б) *D*-типа – триггеры задержки с одним входом;
- в) *T*-типа – триггеры с одним счетным входом;
- г) *JK*- типа – универсальные триггеры с несколькими входами.

по способу управления:

- а) асинхронные;
- б) тактируемые (синхронные).

В асинхронных триггерах переключение из одного состояния в другое осуществляется непосредственно с поступлением сигнала на информационный вход [1, 5, 6].

В синхронных (тактируемых) триггерах помимо информационных входов имеется вход тактовых импульсов. И переключение производится только при наличии разрешающего, тактирующего импульса.

***RS*-триггер**

Асинхронный RS-триггер может выполняться на логических элементах «ИЛИ-НЕ» либо «И-НЕ».

Схема асинхронного *RS*-триггера (рис. 16.1) содержит два элемента ИЛИ-НЕ, имеет два входа. При этом, *S*-вход называется установочным (*set* – устанавливать), устанавливает триггер в состояние логической «1»; а *R*-вход – вход сброса (*reset* – вновь устанавливать), переводит триггер в исходное состояние логического «0», и два выхода *Q* – прямой, \bar{Q} – инверсный. В случае, когда на входах сигналы равны «0» ($R = 0, S = 0$), а на прямом выходе *Q* сигнал равен «1», то на инверсном выходе $\bar{Q} = 0$. То есть на прямом выходе состояние $Q = 1$ сохраняется.

При $R = 0, S = 0$ возможно и второе устойчивое состояние, при котором $Q = 0, \bar{Q} = 1$. То есть при $R = 0, S = 0$, триггер находится в состоянии хранения информации (1-го или 2-го устойчивого состояния).

При $R = 0, S = 1$, триггер оказывается в первом устойчивом состоянии ($Q = 1, \bar{Q} = 0$), а при $R = 1, S = 0$ – во втором устойчивом состоянии ($Q = 0, \bar{Q} = 1$).

Комбинация $R = 1, S = 1$ запрещена, т.е. при $S = 1$ триггер устанавливается в состояние «1», а при $R = 1$ – сбрасывается в состояние «0» (см. таблицу переходов рис 16.1).

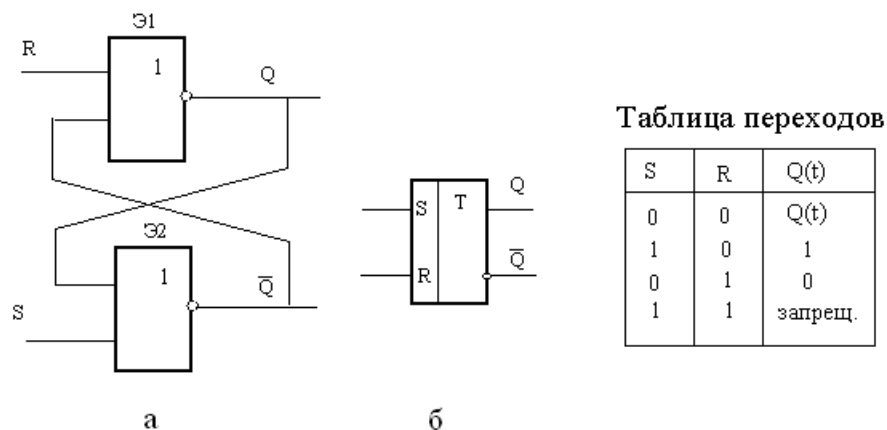


Рисунок 16.1 Схема асинхронного RS-триггера на элементах «ИЛИ-НЕ»
а) условное обозначение, б) и таблица переходов

Аналогичным образом работает *RS*-триггер на элементах И-НЕ (рис. 16.2), с той разницей, что он должен иметь инверсные входы, т.е. устанавливаться в состояние «1» при $S = 0$ и сбрасываться в состояние «0» при $R = 0$. Запрещенная комбинация – при $R = 0, S = 0$.

На основе асинхронного *RS*-триггера строится любой, сколь угодно сложный, триггер: к асинхронному *RS*-триггеру добавляется своя особенная комбинационная схема управления этим триггером.

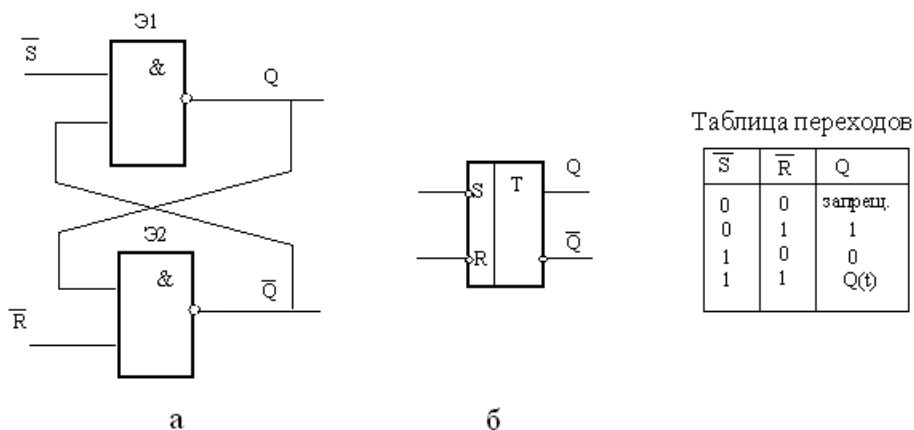


Рисунок 16.2 Схема асинхронного *RS*-триггера на элементах И-НЕ
а) условное обозначение, б) таблица переходов

Синхронный RS- триггер на элементах «И-НЕ» показан на рисунке 16.3. Синхронный *RS*- триггер состоит из схемы асинхронного *RS*- триггера, на входах которого установлены 2 управляющих элемента «И-НЕ» ($\bar{Э}_3, \bar{Э}_4$).

Переключение подобного триггера происходит только при наличии разрешающего сигнала, подаваемого на вход C ($C = 1$). Такой триггер имеет статическое управление, т.е. осуществляет прием информации в течение всего интервала времени, пока $C = 1$.

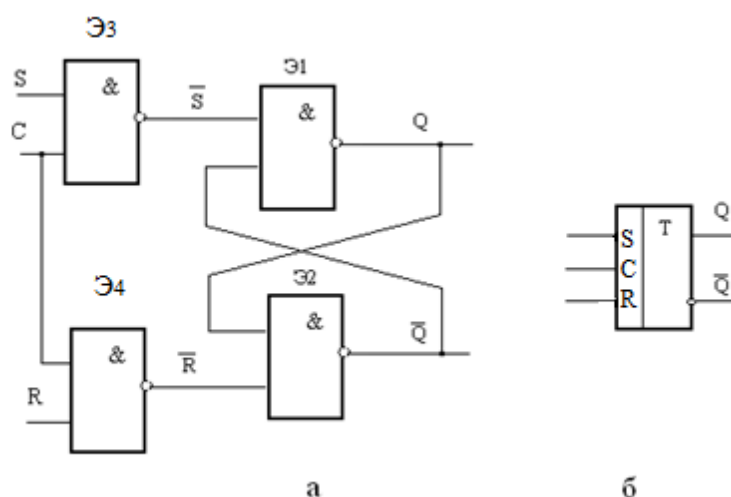


Рисунок 16.3. Схема синхронного RS -триггера на элементах И-НЕ (а) и его условное обозначение (б)

Следует отметить следующие комбинации входных сигналов:

при $R = S = C = 0$ – состояние триггера сохраняется;

при $S = 1, R = C = 0$ – состояние триггера сохраняется;

при $S = 1, R = 0, C = 1$ – на выходе $Q = 1$;

при $S = 0, R = 1, C = 1$ – на выходе $Q = 0$.

Комбинация $S = R = C = 1$ должна быть исключена, так как на выходе элементов Э3, Э4 одновременно присутствовал бы «0», что запрещено для асинхронного триггера.

D- триггеры

D -триггеры (delay – задержка) используют для приема информации по одному входу.

Схема получается из схемы асинхронного RS -триггера (в данном случае на элементах «И-НЕ») (рис. 16.4).

Работает триггер следующим образом. D -триггер переходит в состояние «1», т.е. на выходе $Q = 1$, если в момент прихода синхронизирующего сигнала $C = 1$, на его информационном входе $D = 1$. В этом состоянии триггер остается и после окончания сигнала на входе D , которое длится до прихода очередного синхронизирующего сигнала, возвращающего триггер в состояние «0».

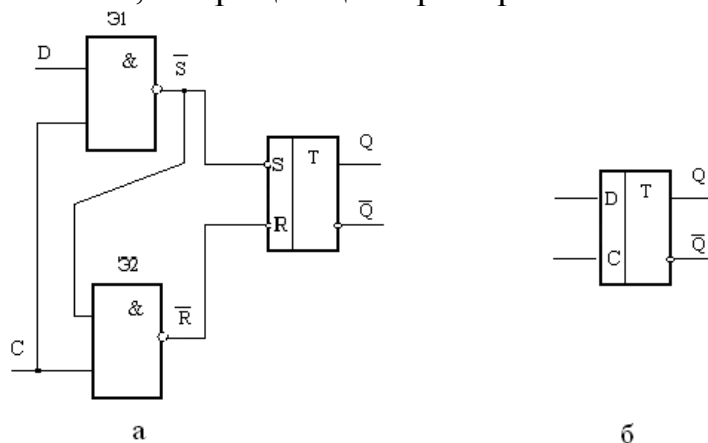


Рисунок 16.4 Схема синхронного D -триггера (а) и его условное обозначение (б)
Это видно на временных диаграммах (рис. 16.5).

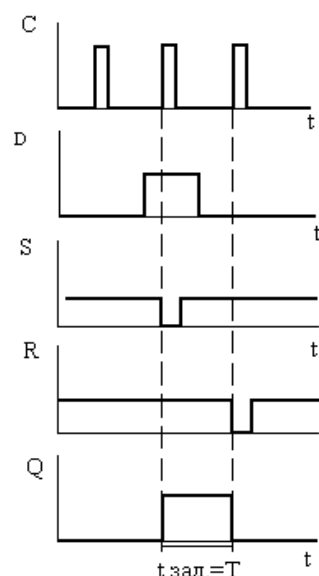


Рисунок 16.5 Временные диаграммы синхронного D -триггера

При $D = 1$, $C = 1$ на выходе \bar{S} элемента Ξ_1 сигнал «0» ($\bar{S} = 0$), на выходе \bar{R} элемента Ξ_2 сигнал «1» ($\bar{R} = 1$). Так как RS- триггер имеет инверсные входы, то при $\bar{S} = 0$, $\bar{R} = 1$ он переходит в состояние «1» ($Q = 1$) и остается в этом состоянии до тех пор, пока при $D = 0$ не придет сигнал $C = 1$. Тогда $\bar{S} = 1$, $\bar{R} = 0$ и триггер возвращается в состояние «0» ($C = 0$). При $D = 0$, $\bar{S} = 1$ и независимо от C на выходе $Q = 0$. Таким образом, D - триггер «задерживает» поступившую на его вход информацию на время, равное периоду синхронизирующих сигналов.

T -триггер

T -триггер (tumble – опрокидываться), или счетный триггер, имеет один информационный вход и переходит в противоположное состояние в результате воздействия на его вход каждого очередного сигнала. Название «счетный» связано с широким применением T -триггеров в счетчиках импульсов.

T -триггеры бывают одноступенчатые и двухступенчатые; а так же синхронные и асинхронные. Одноступенчатый T -триггер может быть реализован на базе D -триггера путем введения обратных связей (рис. 16.6).

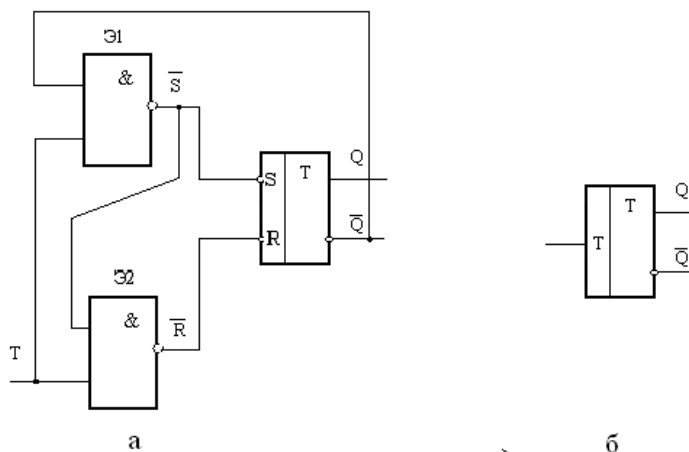


Рисунок 16.6 Схема одноступенчатого T - триггера (а) и его условное изображение (б)

Состояние такого триггера меняется при каждом изменении сигнала на T -входе от «0» к «1» (рис. 16.7).

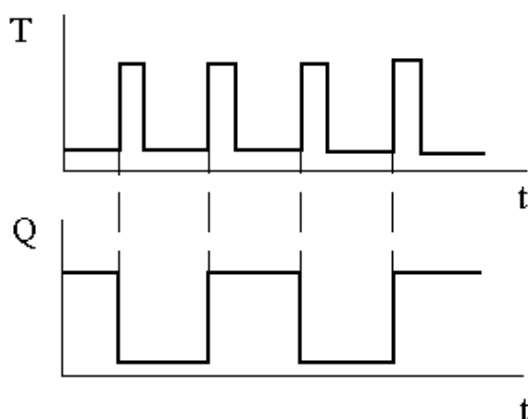


Рисунок 16.7 Временные диаграммы одноступенчатого T -триггера

Двухступенчатые триггеры T -типа выполняются путем введения обратных связей на базе двух последовательно соединенных синхронных или асинхронных RS -триггеров, один из которых называют основным или ведущим; другой – вспомогательным или ведомым (рис. 16.8).

В таком асинхронном T -триггере вход синхронизации C преобразуется в счетный вход T . Состояние такого T -триггера меняется на противоположное при каждом изменении сигнала на T - входе от «1» к «0».

Временные диаграммы показаны на рисунок 16.9.

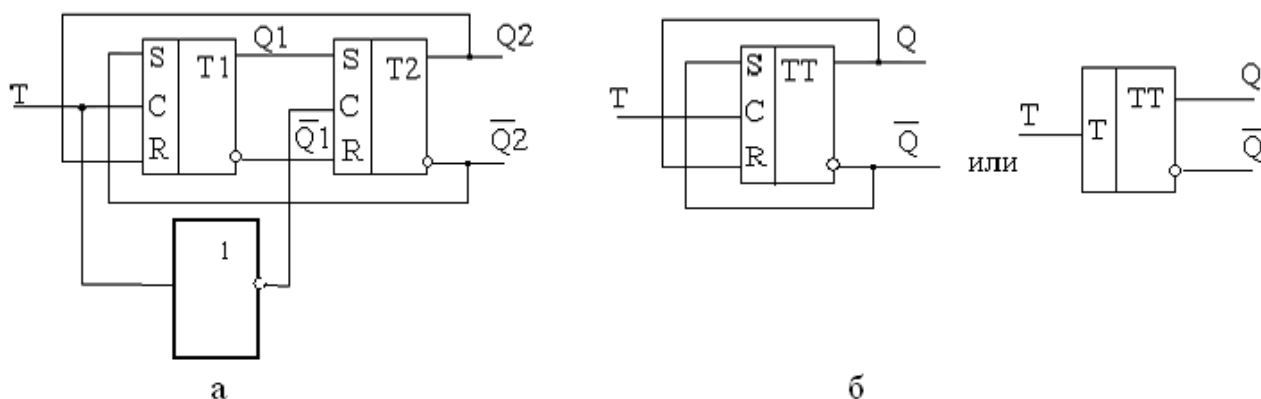


Рисунок 16.8 Схема (а) и условное графическое изображение (б) асинхронного двухступенчатого T - триггера

В данном случае состояние триггера на выходе Q меняется по заднему фронту каждого импульса на T - входе, т.е. при изменении сигнала от «1» к «0». Объясняется это тем, что в момент начала импульса информация записывается в основной триггер, а после его окончания передается во вспомогательный.

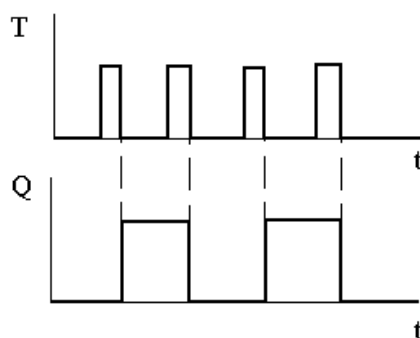


Рисунок 16.9 Временные диаграммы двухступенчатого T -триггера

JK -триггер

JK -триггер может быть построен на основе двухступенчатого T -триггера путем использования элементов И-НЕ на входных цепях ведущего триггера (рис. 16.10).

Вход J соответствует входу S , а вход K – входу R , C – синхронизирующий вход. Поэтому на базе JK - триггеров реализуют синхронный RS - триггер, у которого комбинация $R = S = 1$, запрещенная для обычного RS - триггера, является разрешающей для переключения при $C = 1$.

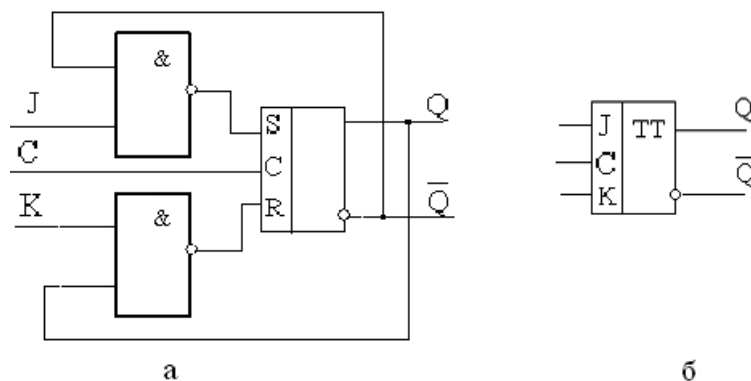


Рисунок 16.10 Схема JK - триггера (а) и его условное обозначение (б).

При $J = K = 1$, JK -триггер изменяет свое состояние на противоположное в момент окончания каждого синхронизирующего сигнала, т.е. реализует функции T -триггера. Поэтому на базе JK -триггера легко реализуется синхронный T -триггер путем объединения входов и использования их в качестве входа T (рис. 16.11, а). Добавляя инвертор на входе JK -триггера получают D -триггер (рис. 16.11, б).

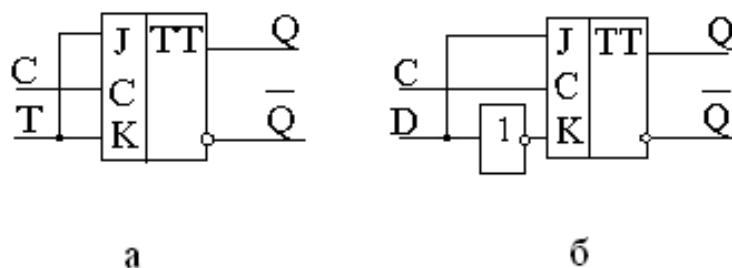


Рисунок 16.11 Схемы T - триггера (а) и D - триггера (б) на основе JK - триггера

Все типы триггеров, реализуемые на основе JK -триггера, дают задержку в появлении выходных сигналов, равную длительности синхронизирующего сигнала. Временные диаграммы JK -триггера показаны на рисунке 16.12.

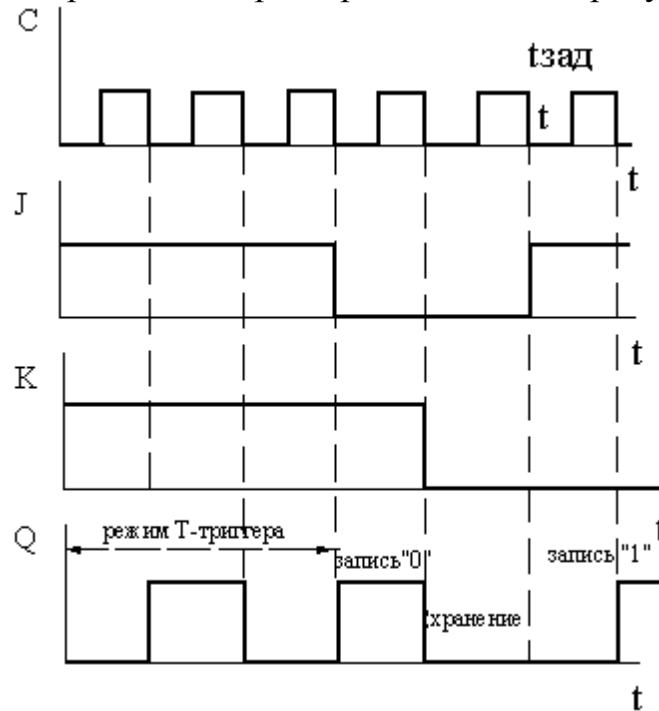


Рисунок 16.12 Временные диаграмм JK - триггера

Примером выполнения триггеров на ИМС являются К155ТВ1, КМ155ТВ1, КР15153ТМ2 и др.

ТЕМА 17. СЧЕТЧИКИ ИМПУЛЬСОВ

С ч е т ч и к – это последовательностное устройство, предназначенное для подсчета числа входных импульсов и фиксации этого числа в двоичном коде. В цифровых схемах они применяются для формирования адресов, подсчета количества циклов, записи входной информации в параллельном коде и т.д.

По способу изменения выходного кода счетчики делятся на:
с у м м и р у ю щ и е – в которых, приход импульса увеличивает показание счетчика на единицу;

в ы ч и т а ю щ и е – приход импульса уменьшает показание на единицу;

р е в е р с и в н ы е работающие в обоих режимах.

Счетчики импульсов выполняют на основе *T*-триггеров, каждому разряду счетчика соответствует 1 триггер

Основным параметром счетчика является **к о э ф ф и ц и е н т** или **м о д у л ь с ч е т а** K - это наибольшее число импульсов, которое может быть подсчитано счетчиком и равное максимальному числу внутренних состояний.

$$K = 2^n \quad \text{где } n - \text{число триггеров.}$$

По способу управления внутренними триггерами счетчики подразделяются на **а с и н х р о н н ы е** (последовательные) и **с и н х р о н н ы е** (параллельные).

В **а с и н х р о н н ы х** счетчиках переключение последующего триггера осуществляется выходным сигналом предыдущего, а входные счетные импульсы приходят на вход только младшего (нулевого) триггера.

Рассмотрим работу асинхронного суммирующего счетчика, выполненного на четырех *JK*-триггерах (рис.17.1). Работу счетчика однозначно определяет таблица состояний (табл.17.1) или временная диаграмма (рис.17.2).

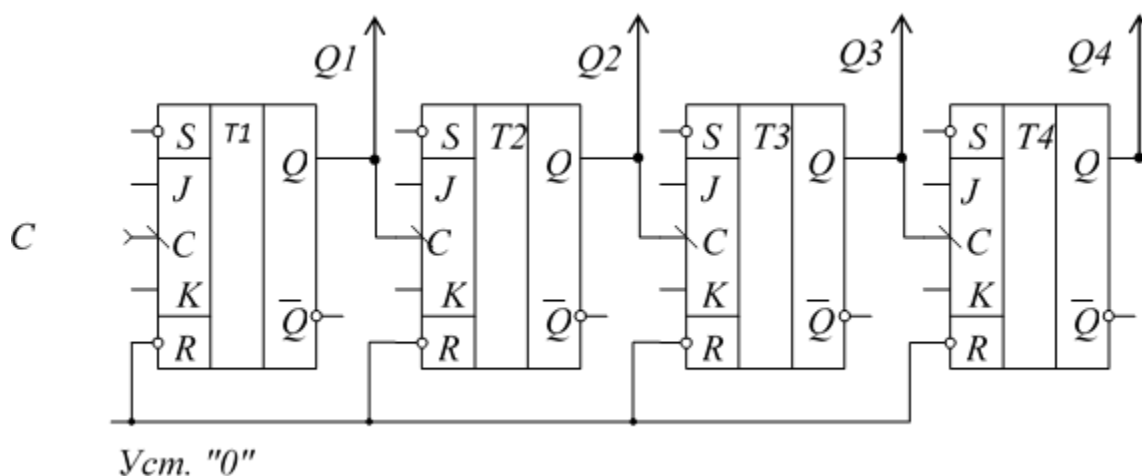


Рисунок 17.1 Схема суммирующего четырехразрядного счетчика импульсов

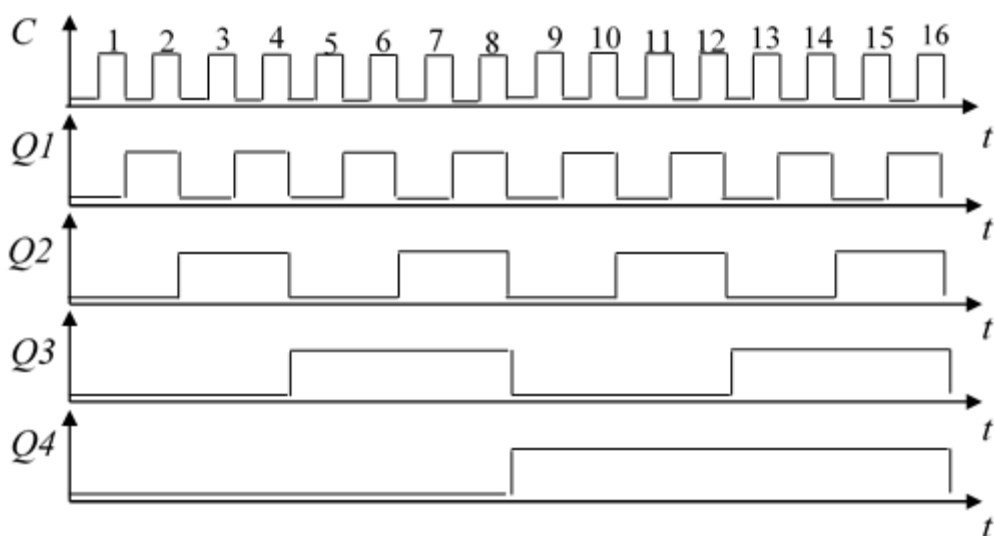


Рисунок 17.2 Временная диаграмма счетчика

Таблица 17.1

| Число импульсов | Состояние триггеров | | | | Десятичн. число |
|-----------------|---------------------|-------|-------|-------|-----------------|
| | Q_4 | Q_3 | Q_2 | Q_1 | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 |
| 3 | 0 | 0 | 1 | 1 | 3 |
| 4 | 0 | 1 | 0 | 0 | 4 |
| 5 | 0 | 1 | 0 | 1 | 5 |
| 6 | 0 | 1 | 1 | 0 | 6 |
| 7 | 0 | 1 | 1 | 1 | 7 |
| 8 | 1 | 0 | 0 | 0 | 8 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 14 | 1 | 1 | 1 | 0 | 14 |
| 15 | 1 | 1 | 1 | 1 | 15 |

В исходном состоянии на объединенные входы R всех триггеров подается низкий уровень сигнала ($R = 0$) для предварительного обнуления счетчика и установки на всех прямых выходах логического нуля: $Q_1=Q_2=Q_3=Q_4=0$.

Счетные импульсы приходят на вход первого триггера $T1$. Выходами счетчика являются прямые выходы триггеров, с которых информация о состоянии предыдущего триггера передается на синхровход последующего. Значение переменной Q_i соответствующего разряда счетчика изменяется, когда переменная в соседнем младшем разряде Q_{i-1} переходит из состояния “1” в “0” (см. Табл.17.1). Для реализации этого свойства последовательного счетчика

JK-триггеры в схеме работают в режиме *T*-триггера с переключением в новое состояние по спаду входного синхроимпульса. Таким образом, частота выходного сигнала каждого триггера в два раза меньше, чем частота сигнала на его входе (см. Рис.13.1, б). Счетчик на выходах формирует нарастающие кодовые наборы от 0000 до 1111, являющиеся двоичными эквивалентами десятичных чисел от 0 до 15. Шестнадцатый импульс переводит все триггеры в исходное нулевое состояние ($K = 2^4 = 16$).

Число, записанное в счетчик, считывается от старшего разряда (Q_4) к младшему(Q_1).

В вычитающем счетчике синхронизирующий вход каждого триггера связан с инверсным выходом (\bar{Q}) предыдущего триггера.

Перед началом счета должна быть предусмотрена установка всех его триггеров в исходное состояние “1”. При счете импульсов вычитающий счетчик будет формировать на прямых выходах триггеров убывающие кодовые наборы от 1111 до 0000.

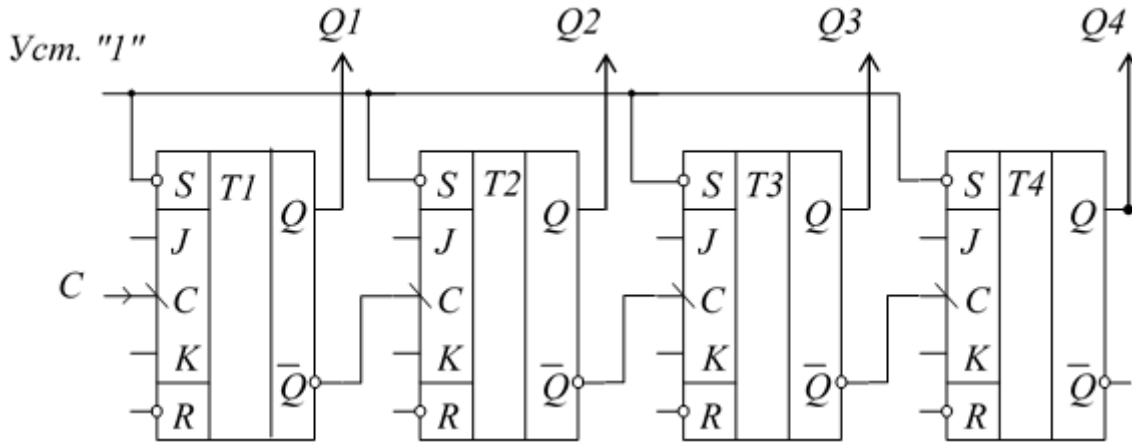


Рисунок 17.3 Вычитающий счетчик

Таблица 17.2

| Число импульсов | Состояние триггеров | | | | Десятич. число |
|-----------------|---------------------|-------|-------|-------|----------------|
| | Q_4 | Q_3 | Q_2 | Q_1 | |
| 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 15 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 14 |
| 2 | 1 | 1 | 0 | 1 | 13 |
| 3 | 1 | 1 | 0 | 0 | 12 |
| 4 | 1 | 0 | 1 | 1 | 11 |
| 5 | 1 | 0 | 1 | 0 | 10 |
| 6 | 1 | 0 | 0 | 1 | 9 |
| 7 | 1 | 0 | 0 | 0 | 8 |
| 8 | 0 | 1 | 1 | 1 | 7 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

В рассмотренных примерах коэффициент счета связан с числом разрядов (триггеров) $K = 2^n$ и может быть равен 2, 4, 8, 16, 32 и т.д. На практике часто требуются счетчики с модулем счета 3, 5, 10, 12. При коэффициенте счета $K \neq 2^n$ счетчик должен содержать n – триггеров, чтобы $2^n > K > 2^{n-1}$. Такой счетчик имеет избыточные состояния, которые устраняются за счет внутренних связей между триггерами.

Рассмотрим реализацию суммирующего десятичного счетчика (модуль счета 10) с *естественным порядком счета*.

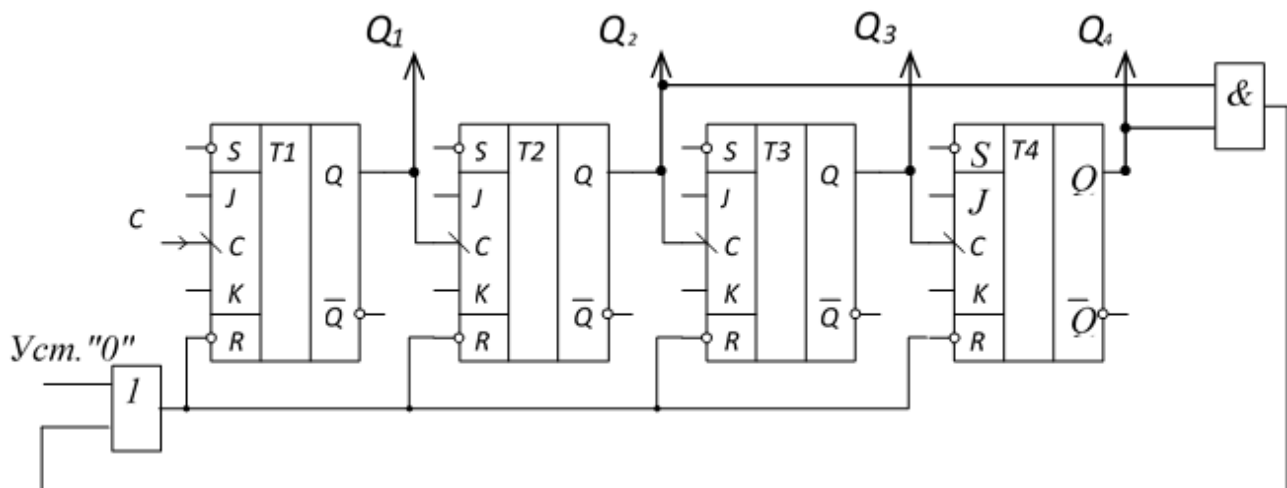


Рисунок 17.4 Суммирующий десятичный счетчик

Таблица 17.3

| Число импульсов | Состояние триггеров | | | | Десятичн. число |
|-----------------|---------------------|-------|-------|-------|-----------------|
| | Q_4 | Q_3 | Q_2 | Q_1 | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | |
| 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | |
| 3 | 0 | 0 | 1 | 1 | |
| 4 | 0 | 1 | 0 | 0 | |
| 5 | 0 | 1 | 0 | 1 | |
| 6 | 0 | 1 | 1 | 0 | |
| 7 | 0 | 1 | 1 | 1 | |
| 8 | 1 | 0 | 0 | 0 | |
| 9 | 1 | 0 | 0 | 1 | |
| 10 | 1 | 0 | 1 | 0 | сброс |
| | | | | | |
| 11 | 1 | 0 | 1 | 1 | |

При комбинации на выходах счетчика соответствующей 10 в двоичной системе 1010 логический элемент И формирует сигнал «1», который вызывает обнуление счетчика. Счет такой же, как и в двоичных счетчиках, но заканчивается раньше, чем 2^n , путем введения обратных связей.

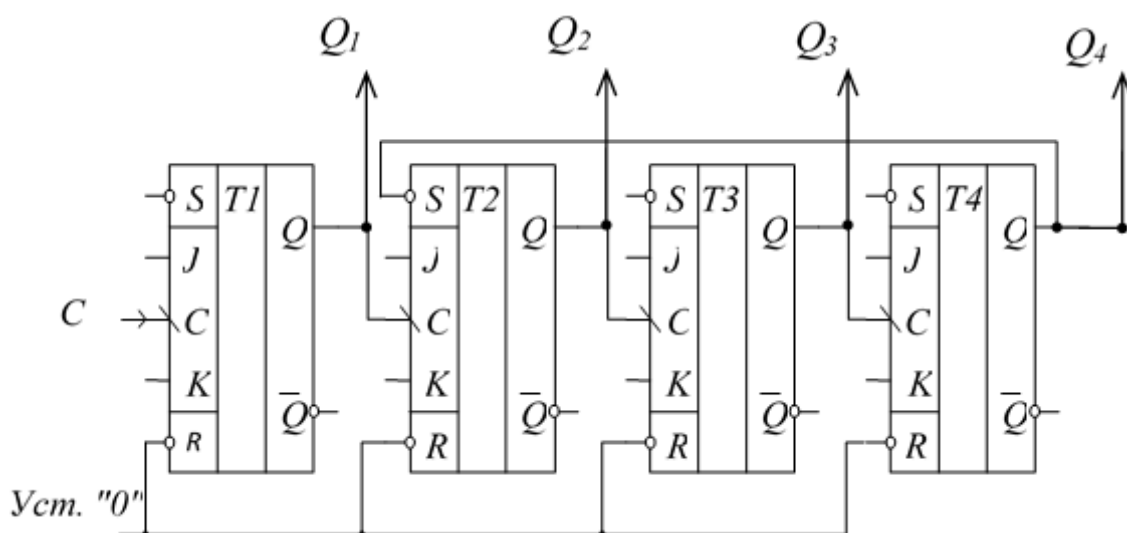


Таблица 17.4

Показания рассматриваемого счетчика не соответствует двоичной системе счисления. Пока $Q_4=1$ счетчик работает как двоичный. С приходом восьмого импульса принудительно записывается «1» во второй и третий разряд счетчика $Q_2 = Q_3 = Q_4 = 1$.

Счетчики с $K = 10$ называют десятичными или декадными, при последовательном соединении нескольких счетчиков можно реализовать счет на 100, 1000 и т.д.

ТЕМА 18. РЕГИСТРЫ

Регистрами называют устройства, предназначенные для приема, хранения, передачи и преобразования информации в виде двоичного числа или другой кодовой информации.

В зависимости от способа записи и считывания информации различают следующие типы регистров:

- 1) параллельные;
- 2) последовательные;
- 3) параллельно-последовательные.

Основные элементы регистра – двоичные ячейки, в качестве которых применяются триггеры. Число триггеров определяется длиной «слова», т.е. числом двоичных разрядов «слова» («слово» - законченный объём информации)

Схема *параллельного 4-разрядного регистра* показана на рис. 18.1. В параллельных регистрах запись двоичного числа, или «слова», осуществляется параллельным кодом, т.е. во все разряды регистра одновременно.

Перед началом работы все разряды регистра устанавливаются в состояние «0» подачей сигнала на все объединённые входы R триггеров. Информация во внутренние разряды регистра записывается по команде «Запись» (т.е. на входе «Запись» должна быть «1»). Тогда сигналы на каждом из 4- входов установят триггеры в соответствующие состояния. На выходной шине регистра информация появится по команде «Считывание», а при ее отсутствии на выходах – нули. При считывании информация, записанная в регистре, сохраняется. Поэтому такие регистры называют регистрами памяти.

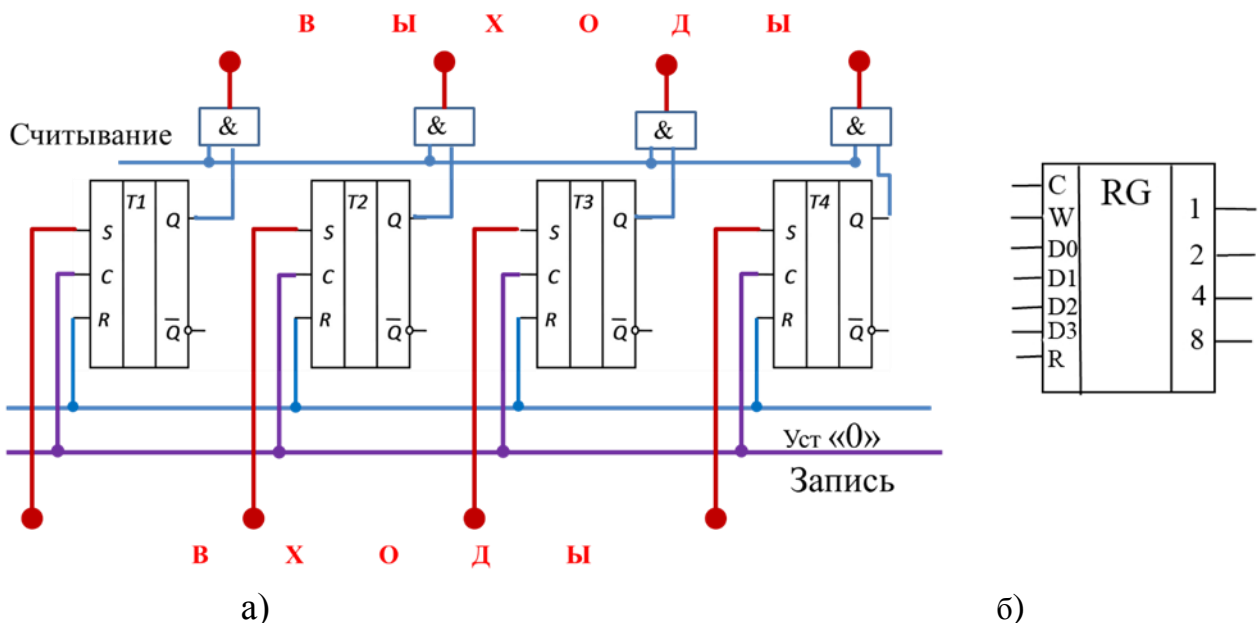


Рисунок 18.1 Параллельный регистр
а) структура на RS – триггерах, б) условное обозначение

Последовательные (сдвиговые) регистры состоят из последовательно соединенных двоичных ячеек памяти (триггеров), состояния которых передаются (или сдвигаются) на последующие ячейки под действием тактовых импульсов.

Структурная схема последовательного четырехразрядного регистра показана на рис. 18.2. Регистр состоит из JK – триггеров, работающих в режиме D – триггера, что обеспечивается подачей инверсных сигналов на J и K входы. Перед записью информации регистр устанавливается в ноль сигналом на выходы R триггеров.

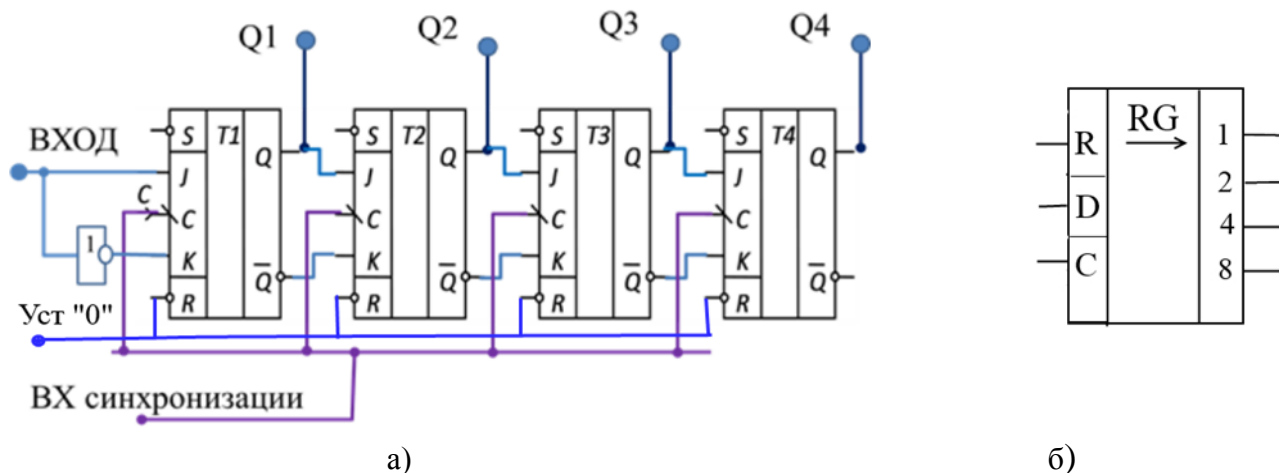


Рисунок 18.2 Структурная схема последовательного регистра (а) и его условное обозначение (б)

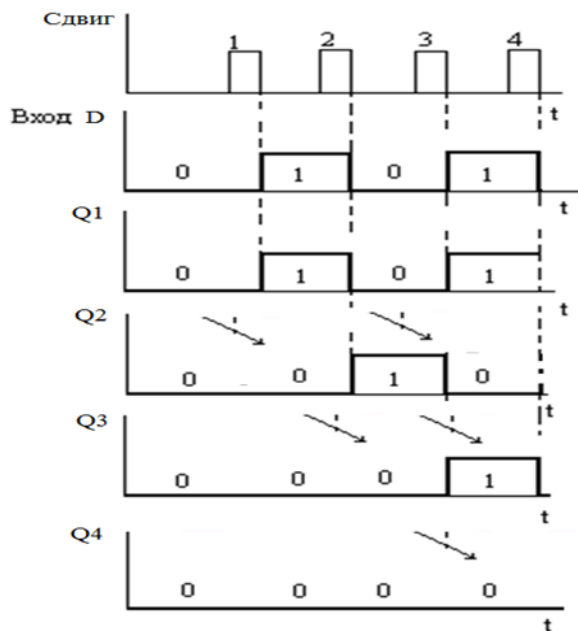


Рисунок 18.3 Временные диаграммы работы сдвигового регистра

При записи информации одновременно с поступлением кода числа подаются тактовые импульсы на входы C . Тактовыми импульсами осуществляется продвижение информации от младшего разряда регистра к старшему. В результате этого процесса после четвертого тактового импульса

ячейки регистра принимают состояние, соответствующее коду входного четырехразрядного числа (рис. 18.3). Регистр сдвига преобразует последовательный код на входе в параллельный на выходе.

В параллельно-последовательных (реверсивных) регистрах сочетаются свойства регистров последовательного и параллельного действия. В этой связи они могут быть использованы для преобразования последовательного кода в параллельный и обратно (рис. 18.4).

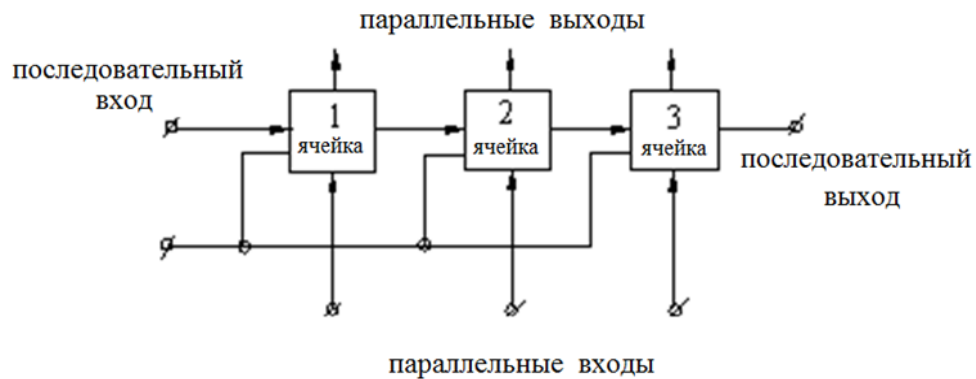


Рисунок 18.4 Структурная схема параллельно-последовательного регистра

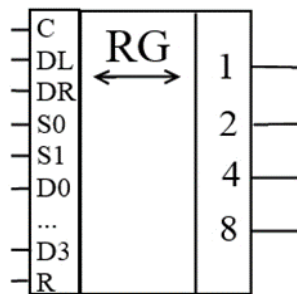


Рисунок 18.5 Обозначение реверсивного регистра

Примеры выполнения регистров на ИМС – К155ИР13, КР580ИР82 и др.

ТЕМА 19. КОМБИНАЦИОННЫЕ СХЕМЫ

Комбинационными называются логические устройства, выходные сигналы которых однозначно определяются комбинацией входных сигналов. Используются в информационно-измерительных системах, системах автоматического управления, устройствах промышленной автоматики и т.п. К комбинационным схемам относятся следующие устройства: дешифраторы и шифраторы, мультиплексоры и демультиплексоры, сумматоры.

Шифратор (CD - кодер) – комбинационная схема, преобразующая однопозиционный код в двоичный позиционный код. Примером является шифратор клавиатуры для ввода в цифровое устройство кода в двоичной системе счисления. При не нажатых клавишах на всех входах шифратора – логический «0», а нажатая клавиша подает на соответствующий вход логическую «1». Совокупность сигналов на входах образует код в двоичной системе, соответствующий нажатой клавише.

Логическая схема шифратора на два выхода приведена на рис. 19.1, а.

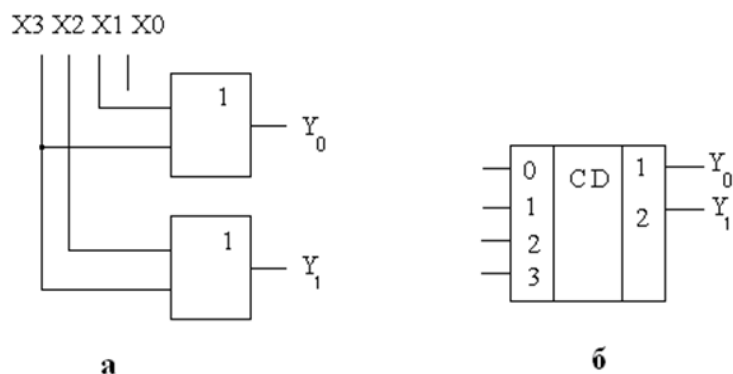


Рисунок 19.1 Схема шифратора (а) и его условное обозначение (б)

Работа схемы описывается таблицей истинности (таб. 19.1), где выходные сигналы определяются в соответствии со схемой по следующим формулам:

$$Y_0 = X1 + X3;$$

$$Y_1 = X2 + X3$$

Таблица 19.2 Таблица истинности шифратора

| Входные сигналы | | | | Выходные сигналы | |
|-----------------|----|----|----|------------------|----|
| X3 | X2 | X1 | X0 | Y1 | Y0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |

Таким образом, при подаче на вход, например, сигнала X_2 («1» на входе X_2) на выходе шифратора получаем сигналы 10 в двоичной системе, что соответствует числу 2 в десятичной системе счисления.

Очевидно, что в данном шифраторе сигнал, подаваемый на вход X_0 , не используется. Примером ИС шифратора может служить ИС К555 ИВЗ.

Дешифратором (DC - декодером) называют устройство, предназначенное для распознавания различных кодовых комбинаций (или слов) В дешифраторе каждой комбинации сигналов на входе соответствует сигнал только на одном из его выходов. В микропроцессорах дешифраторы выполняют расшифровку кодов команд, адресов ячеек памяти, осуществляют коммутацию цепей.

Логическая схема дешифратора на два входа приведена на рисунке 19.2, а.

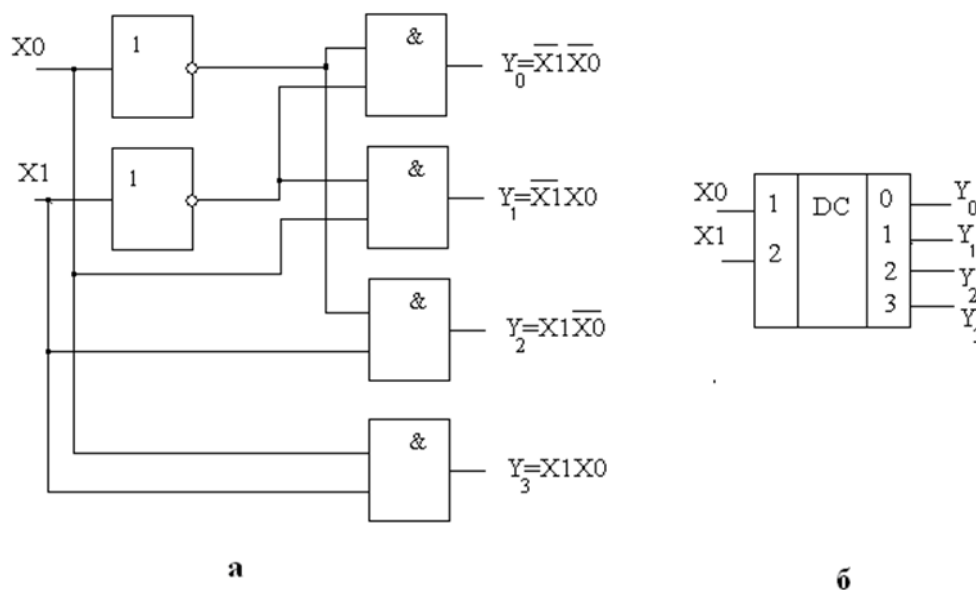


Рисунок 19.2 Схема дешифратора (а) и его условное обозначение (б)

Работа схемы описывается таблицей истинности (табл. 19.1), где выходные сигналы определяются в соответствии со схемой по следующим формулам:

$$Y_0 = \overline{X_1} \cdot \overline{X_0}; Y_1 = \overline{X_1} \cdot X_0; Y_2 = X_1 \cdot \overline{X_0}; Y_3 = X_1 \cdot X_0$$

Таблица 19.2 Таблица истинности дешифратора

| Входные сигналы | | Выходные сигналы | | | |
|-----------------|-------|------------------|-------|-------|-------|
| X_1 | X_0 | Y_0 | Y_1 | Y_2 | Y_3 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |

Таким образом, в зависимости от комбинации входных сигналов (т.е. двоичного кода) единичный сигнал будет появляться только на одном из

выходов дешифратора. Например, если комбинация входных сигналов 10, то единичный сигнал будет на выходе Y_2 , что соответствует цифре 2 в десятичной системе счисления и т.д.

Дешифраторы выпускаются в виде ИМС различных серий в зависимости от назначения, например, К555 ИДЗ.

Мультиплексор (MS) – операционный узел, осуществляющий микрооперацию передачи сигнала с одного из входов на один выход, т.е. используется для последовательного опроса логических состояний большого числа переменных и передачи их на один выход.

Схема мультиплексора с двумя информационными входами (X_0, X_1) и управляющим (или адресным) входом a показана на рисунке 19.3.

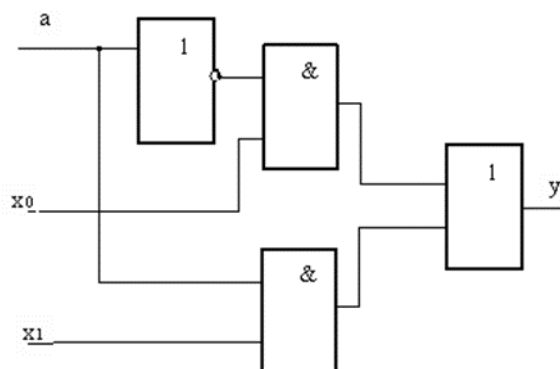


Рисунок 19.3 Схема мультиплексора с двумя информационными входами

При сигнале на адресном входе $a = 1$ на выход передаётся значение x_1 , а при сигнале $a = 0$ – значение x_0 .

Мультиплексор на 4 входа ($x_0 - x_3$) имеет 2 адресных входа a_0 и a_1 (рис. 19.4). Если сигнал $a_0 = 1$, то передаётся значение x_1, x_3 ; если сигнал $a_0 = 0$, то x_0, x_2 ; если $a_1 = 1$, то x_2, x_3 ; если $a_1 = 0$ то x_0, x_1 .

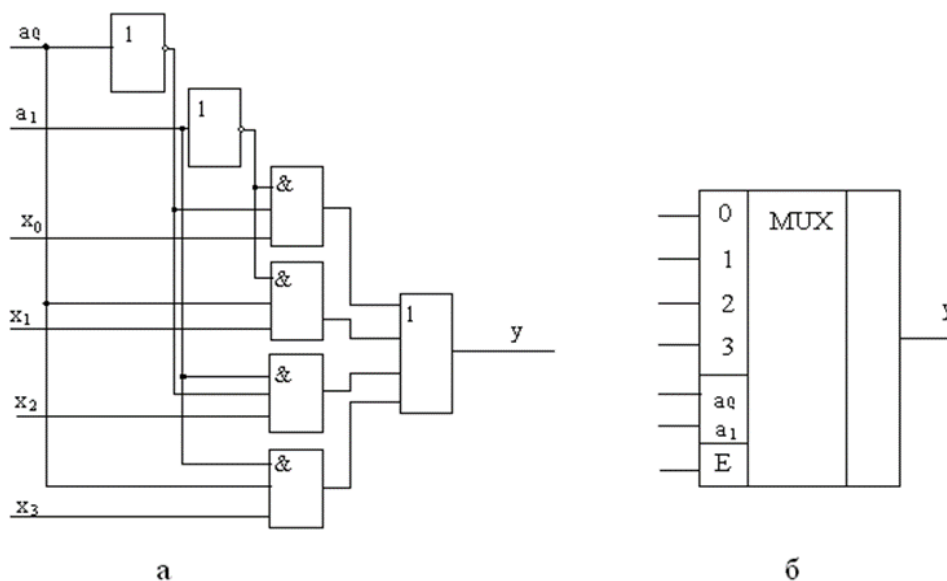


Рисунок 19.4 Схема мультиплексора на 4 входа (а) и его условное обозначение (б)

Из схемы видно, что сигнал на выходе y будет складываться из 4-х слагаемых: $y = a_1 \times a_0 \times x_0 + a_1 \times a_0 \times x_1 + a_1 \times a_0 \times x_2 + a_1 \times a_0 \times x_3$

Например, если $a_1 = 1, a_0 = 0$, то

$y = 0 \times 1 \times x_0 + 0 \times 0 \times x_1 + 1 \times 1 \times x_2 + 1 \times 0 \times x_3 = x_2$, т.е. адрес входа мультимплексора $A = (a_1, a_0) = 10_2 = 2_{10}$, т.е. опрашивается 2 вход.

Мультимплексоры выпускаются в виде ИС, например, ИС К555 КП2, КР1533КП2.

Демультимплексор (DMS) – операционный узел, в котором сигналы с одного информационного входа распределяются в желаемой последовательности по нескольким выходам. Схема демультимплексора на четыре выхода показана на рисунке 19.5, а.

Функцию демультимплексора может выполнять стробируемый дешифратор, в котором информационный сигнал X подается на стробирующий вход S , а остальные входы используются как адресные.

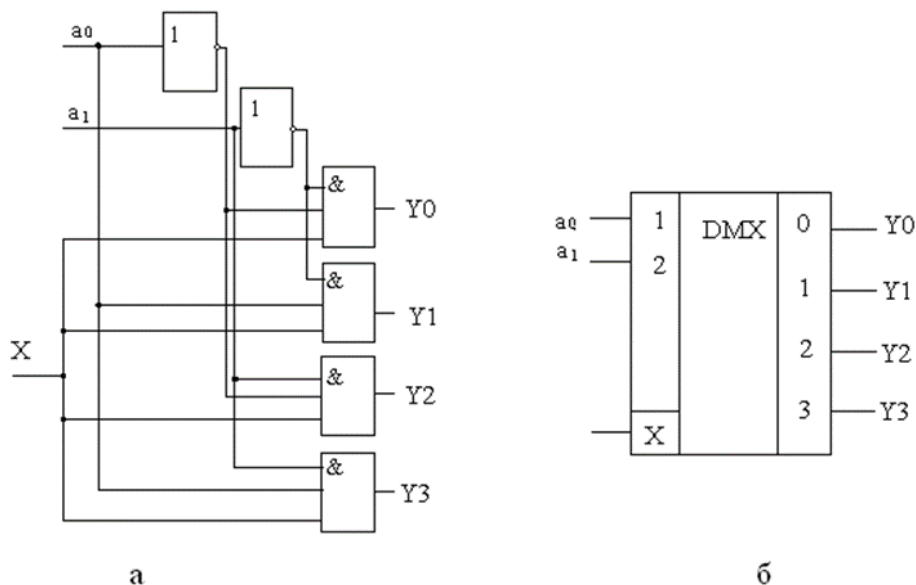


Рисунок 19.5 Схема демультимплексора (а) и его условное обозначение (б)

Сумматор – операционный узел, выполняющий арифметическое суммирование кодов чисел. Сумматоры входят в состав арифметико-логического устройства (АЛУ) ЭВМ.

Классификация сумматоров:

По системе кодирования:

- двоичные,
- двоично-десятичные,
- десятичные и др.;

По способу организации суммирования:

- комбинационные (результат суммирования не запоминается),
- накапливающие (результат суммирования запоминается);

По способу выполнения операций:

- последовательные,

- параллельные,
- параллельно-последовательные.

Простейшим сумматором является одноразрядный двоичный сумматор, или *полусумматор*. Он предназначен для сложения двоичных цифр, в результате чего образуется их сумма и осуществляется перенос в соответствии с правилами двоичного сложения, имеет 2 входа (X, Y) и 2 выхода (S – сигнал суммы и C – сигнал переноса в следующий разряд). Схема на логических элементах и условное графическое изображение полусумматора показано на рис. 19.6.

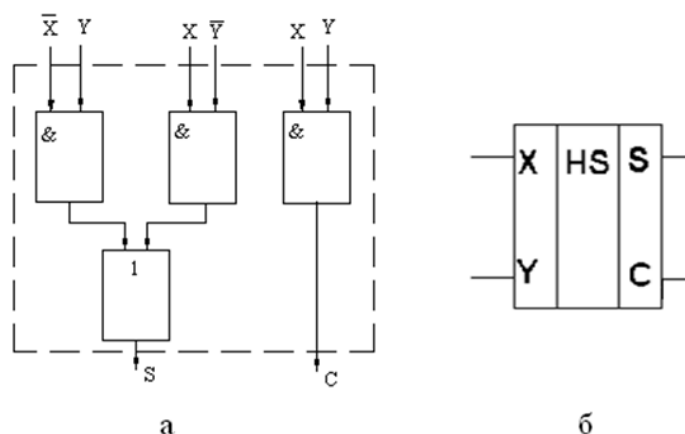


Рисунок 19.6 Схема полусумматора на логических элементах (а) и его условное обозначение (б)

Если только на одном из входов сигнал равен 1, то выходной сигнал на линии выхода $S = 1$. Если оба входных сигнала равны 1, то выходной сигнал на выходе $S = 0$, а на выходе C (перенос) сигнал равен 1. Для всех остальных комбинаций входных сигналов перенос $C = 0$. Логические соотношения для этой схемы будут таковы:

$$S = \bar{X}Y + X\bar{Y}; C = XY.$$

Комбинации входных сигналов полусумматора X, Y и соответствующие им выходные сигналы S и C показаны в таблице 19.3.

Таблица 19.3 Входные сигналы полусумматора X, Y и выходные сигналы S, C

| Вход | | Выход | |
|------|-----|-------|-----|
| X | Y | S | C |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 1 |

В таком одноразрядном сумматоре не учитывается перенос из младшего разряда. Полный сумматор используется при сложении более двух двоичных цифр. В таком сумматоре три входа: два входа для первого и второго слагаемых, третий вход – для сигнала переноса из младшего разряда.

Рассмотрим пример сложения двух двоичных чисел 1011 и 1110:

$$\begin{array}{r}
 + 1011 \\
 + 1110 \\
 \hline
 11001 \text{ — сумма}
 \end{array}
 \quad \text{или} \quad
 \begin{array}{r}
 + 1011 \\
 + 1110 \\
 \hline
 0101 \text{ — частичная сумма} \\
 1 \ 1 \text{ — разряды переноса} \\
 \hline
 11001 \text{ — полная сумма}
 \end{array}$$

Цифры переноса в каждом столбце должны быть учтены в процессе сложения.

Таким образом, сумматор (рис. 19.7) имеет 3 входа и 2 выхода: выход S — для выходного значения поразрядной суммы и выход C_0 — для выходного сигнала переноса, который суммируется в следующем разряде.

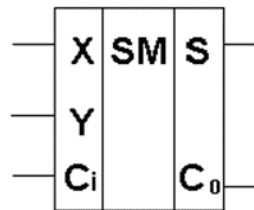


Рисунок 19.7 Условное обозначение сумматора

Логические соотношения для сумматора будут следующими:

$$\begin{aligned}
 S &= \overline{X} \overline{Y} C_i + \overline{X} Y C_i + X \overline{Y} C_i + X Y C_i, \\
 C_0 &= X C_i + X Y + Y C_i.
 \end{aligned}$$

Рассмотрим работу четырехразрядного параллельного двоичного сумматора, схема которого представлена на рисунке 19.8.

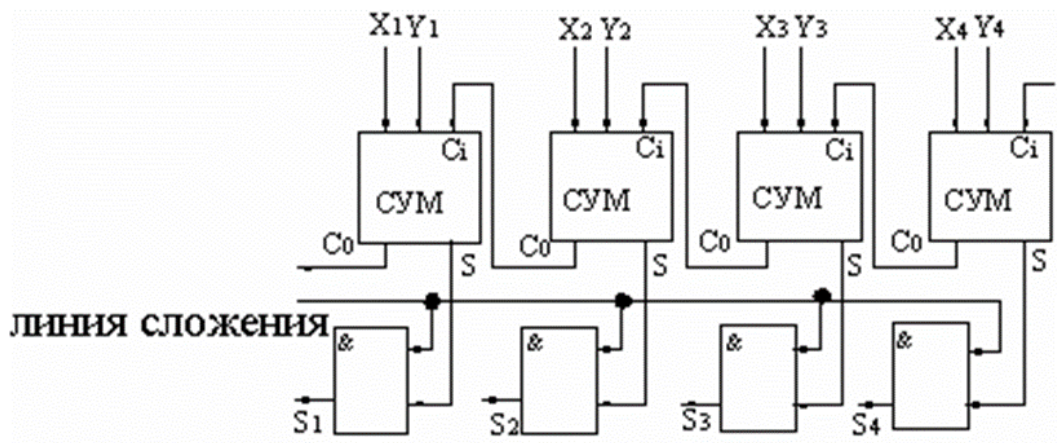


Рисунок 19.8 Схема четырехразрядного параллельного двоичного сумматора

Например, входы для первого слагаемого $X1...X4$, для второго $Y1...Y4$. Пусть первое число — 0111, а второе — 0011. Их сумма 1010, т.е. $S1 = 1$, $S2 = 0$, $S3 = 1$, $S4 = 0$.

Так как $X4$ и $Y4$ — младшие разряды, то перенос из предыдущего разряда в них не поступает. $X4 = 1$ и $Y4 = 1$, $S = 0$, при этом возникает перенос, который

суммируется в сумматоре вместе с разрядами X_3 и Y_3 . Так как $X_3 = 1$ и $Y_3 = 1$ и $C_i = 1$, то $S_3 = 1$, на линии переноса также появится единица.

Так как $X_2 = 1$, $Y_2 = 0$, $C_i = 1$, то $S_2 = 0$, перенос в следующий разряд будет = 1. Так как $X_1 = 0$, $Y_1 = 0$, $C_i = 1$, то $S_1 = 1$, перенос будет = 0.

Сумматоры выпускаются в виде ИМС, например, К561ИМ1 – сумматор на 4 разряда.

ТЕМА 20. ГЕНЕРАТОРЫ ИМПУЛЬСОВ

Мультивибраторы

Мультивибраторы предназначены для генерирования периодической последовательности импульсов напряжения прямоугольной формы. Мультивибраторы обычно выполняют функцию задающего генератора, формирующего запускающие входные импульсы для последующих узлов и блоков.

Классификация мультивибраторов производится по следующим признакам:

по виду используемых элементов:

- а) мультивибраторы на транзисторах;
- б) мультивибраторы на ИМС.

по режиму работы:

- а) автоколебательные;
- б) ждущие.

Автоколебательные мультивибраторы

Подобно генераторам синусоидальных колебаний, автоколебательные мультивибраторы работают в режиме самовозбуждения. Для формирования импульсного сигнала внешнее воздействие не требуется. Процесс получения импульсного напряжения основывается на преобразовании энергии источника постоянного напряжения. Автоколебательные мультивибраторы могут быть построены на транзисторах (рис. 20.7) или на операционном усилителе (ОУ) (рис. 20.8).

Автоколебательный мультивибратор на транзисторах.

В автоколебательном режиме (рис. 20.7) транзисторы поочередно переходят из открытого состояния в закрытое и обратно. При включении источника коллекторного питания $+E_k$ один из транзисторов окажется открытым, а другой – закрытым. Если открыт, например, транзистор $VT1$, то конденсатор $C1$, зарядившийся во время установления процессов в схеме, начинает разряжаться по двум цепочкам: через сопротивления R_{k1} и $R1$ и коллектор – эмиттер транзистора $VT1$ и эмиттер – база транзистора $VT2$.

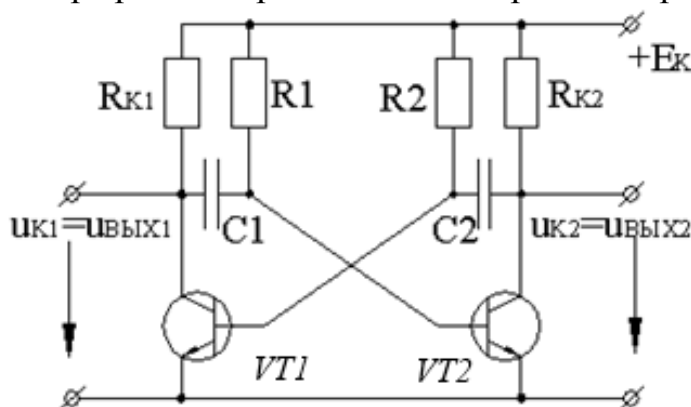


Рисунок 20.7 Схема автоколебательного мультивибратора на транзисторах

Разрядный ток создаёт на резисторе $R1$ падение напряжения, убывающее по мере уменьшения этого тока по экспоненте. И это напряжение приложено к базе транзистора $VT2$ и поддерживает его в закрытом состоянии, т.е. $U_{бэ}$ $VT2$ увеличивается по экспоненте (рис. 20.8).

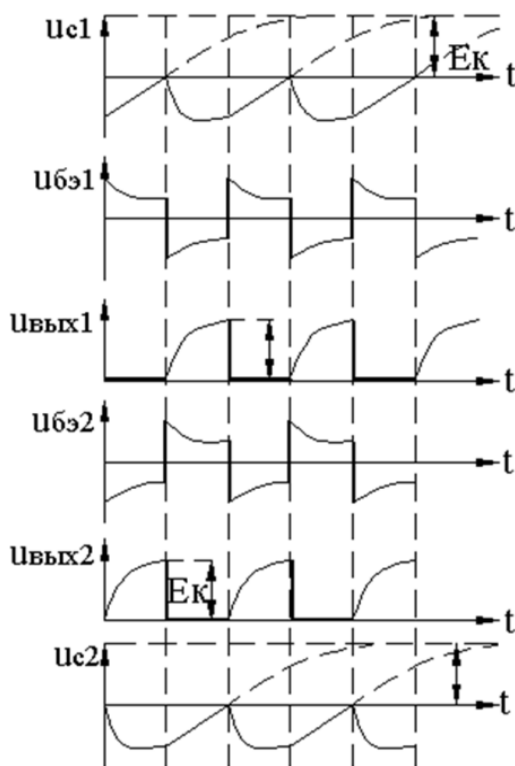


Рисунок 20.8 Временные диаграммы автоколебательного мультивибратора на транзисторах

В это же время конденсатор $C2$ заряжается от источника E_k через участок эмиттер – база открытого транзистора $VT1$ и резистор $R_{к2}$. По мере заряда конденсатора $C2$ ток, протекающий по $R_{к2}$ уменьшается и потенциал коллектора $VT2$, увеличивается по экспоненте. Через время, когда конденсатор $C2$ зарядится, потенциал коллектора станет примерно равен E_k . Т.к. $R1 \gg R_{к2}$, то процесс разряда конденсатора $C1$ проходит значительно медленнее, чем процесс заряда конденсатора $C2$. Когда потенциал базы $VT2$ приблизится к нулю, при полной разрядке $C1$, $VT2$ приоткроется и начнет проводить ток. С этого момента, в результате действия положительной обратной связи, происходит лавинообразный процесс, в результате которого транзистор $VT2$ открывается, а транзистор $VT1$ закрывается, т.к. напряжение на конденсаторе $C2$ приложено обратно к базе – эмиттер $VT1$. Далее все процессы повторяются, но уже относительно открытого транзистора $VT2$. Таким образом, параметры элементов $C1, R1, C2, R2$ определяют длительность импульса соответственно на выходе 1 и выходе 2:

В симметричном мультивибраторе выделяют следующие параметры:

1. период колебания $T \approx 1,4R_1C$;

2. амплитуда импульсов $U_m \approx \frac{E_K}{1,2...1,3}$;
3. длительность импульсов $t_H \approx 0,7 R_1 C$;
4. длительность переднего фронта $t_\phi \approx 2 R_K C$.

Автоколебательный мультивибратор на ОУ

Мультивибратор на ОУ относится к самовозбуждающимся генераторам (рис. 20.9). ОУ работает в импульсном режиме (на нелинейном участке амплитудной характеристики). Он сравнивает два сигнала: по неинвертирующему входу U_1 и по инвертирующему входу U_c (напряжение конденсатора $C1$). В результате перезарядки конденсатора выходное напряжение скачком изменяется от $U_{\text{вых max}}$ до $U_{\text{вых min}} = -U_{\text{вых max}}$. При $R3 = R4$ длительность импульса $t_H \approx 1,1 R2 C1$, а период импульса $T = 2t_H \approx 2,2 R2 C1$. Изменяя величины сопротивления $R2$ и конденсатора $C1$, можно регулировать длительность, частоту и амплитуду импульсов.

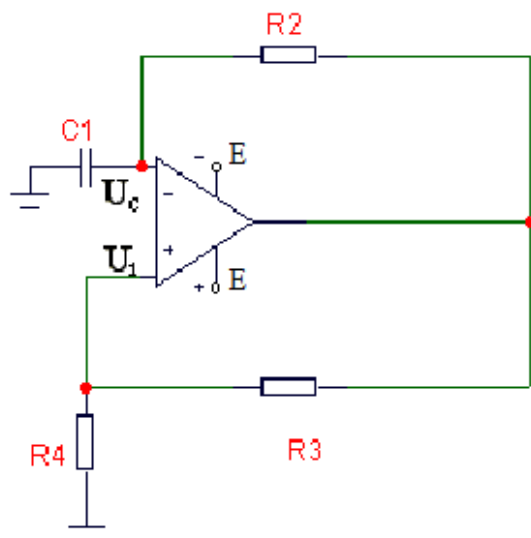


Рисунок 20.9 Схема автоколебательного мультивибратора на ОУ

Автоколебательный мультивибратор на логических элементах

Такой мультивибратор работает следующим образом (рис. 20.10). Когда логический элемент Э1 И-НЕ закрыт, а логический элемент Э2 И-НЕ – открыт, то на выходе Э1 действует напряжение высокого уровня и конденсатор $C2$ заряжается, напряжение $U_{\text{вх2}}$ – высокое и поддерживает Э2 в открытом состоянии, напряжение $U_{\text{с1}} = 0$, напряжение $U_{\text{вх1}}$ – низкое.

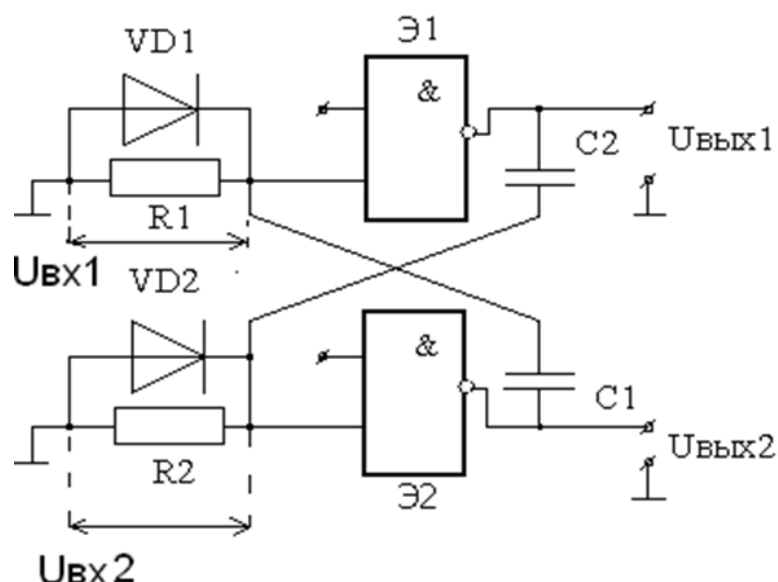


Рисунок 20.10 Схема автоколебательного мультивибратора на ЛЭ

При достижении $U_{вх2}$ некоторого предельного значения, элемент Э2 запирается, $U_{вых2}$ через $C1$ передается на вход логического элемента Э1 и он открывается.

Ждущий мультивибратор

В ждущем режиме имеется одно состояние устойчивого равновесия и одно состояние квазиравновесия. Переход из первого состояния во второе происходит под воздействием внешнего запускающего импульса, а обратный переход - самопроизвольно по истечении некоторого времени. Ждущие мультивибраторы называют еще одновибраторами.

Ждущий мультивибратор на транзисторах.

Схема ждущего мультивибратора с эмиттерной связью показана на рисунке 20.11.

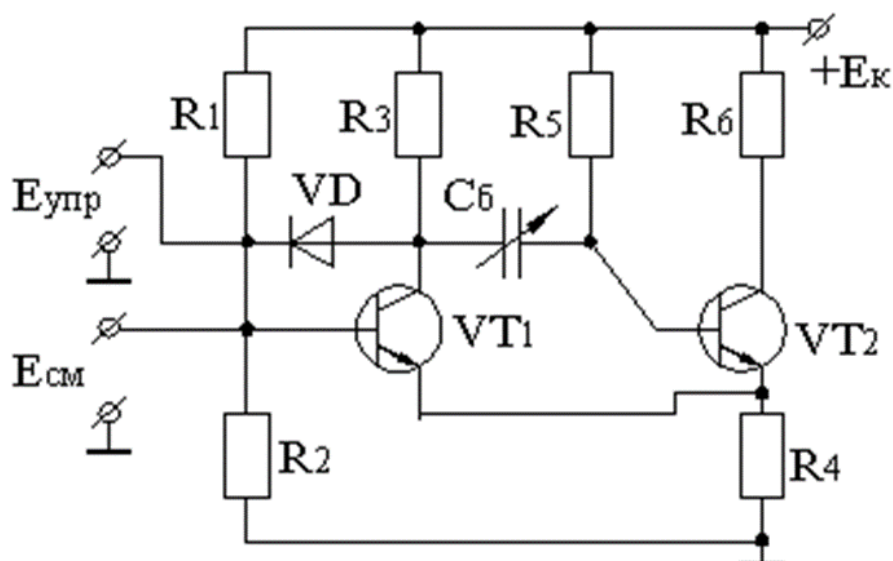


Рисунок 20.11 Схема ждущего мультивибратора на транзисторах

В устойчивом состоянии схемы при отсутствии запускающих импульсов транзистор $VT2$ открыт положительным смещением от источника питания $+E_k$ через резистор $R5$. Протекающий через резистор ток вызывает падение напряжения на резисторе $R4$. Потенциал базы транзистора $VT1$ устанавливается делителем $R1, R2$. Сопротивления $R1, R2, R4$ выбирают такими, чтобы $U_{б1} < U_{э2}$, поэтому в устойчивом состоянии $VT1$ закрыт. Емкость C_6 оказывается подключенной левой обкладкой через $R3$ к источнику E_k , а правой через открытый переход эмиттер – база к резистору $R4$.

При поступлении на вход запускающего импульса положительной полярности транзистор $VT1$ открывается. При этом положительная обкладка конденсатора C_6 присоединяется через открытый $VT1$ к эмиттеру $VT2$, а отрицательная обкладка к его базе. Это приводит к запирающему транзистора $VT2$ и, следовательно, резкому увеличению потенциала на его коллекторе и прерыванию тока через коллектор – эмиттер транзистора $VT2$.

С моментом открывания транзистора $VT1$ начинается перезаряд емкости током, протекающим по цепи $+E_k, R5, C_6$, коллектор – эмиттер $VT1, R4$, "земля".

Напряжение $U_{б2}$ при этом постепенно возрастает и достигает порога отпирания транзистора $VT2$. Т. е. $U_{э2} > U_{б1}$, $VT1$ запирается, возвращая схему в исходное состояние (т.е. напряжение $U_{к2}$ скачком снижается, заканчивая формирование прямоугольного импульса на выходе схемы).

Таким образом, ждущий мультивибратор реагирует на поступление короткого запускающего импульса формированием одиночного прямоугольного импульса, длительность которого определяется параметрами времязадающей цепи мультивибратора ($R5, C$) с постоянной времени $\tau \cong R5C$.

Ждущие мультивибраторы используют для расширения импульсов; для задержки сигнала на заданное время (запускающий импульс может быть задержан на время, равное длительности импульса ждущего мультивибратора; если к его выходу подключить устройство, реагирующее на период напряжения по окончании выходного импульса, то можно реализовать реле времени); для задания регулируемых интервалов времени (таймеры).

Ждущий мультивибратор на логических элементах

В исходном состоянии на входе логического элемента Э1 действует напряжение высокого уровня — логическая единица (рис. 20.12).

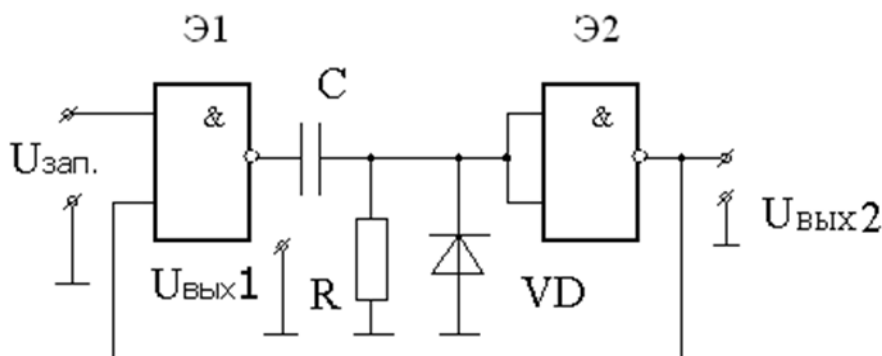


Рисунок 20.12 Схема ждущего мультивибратора на ЛЭ

Напряжение на входах элемента Э2 равно напряжению на резисторе R , которое создается на нем входным током логического элемента Э2. На входах элемента Э2 имеется логический ноль, на выходе — логическая единица, которая передается на второй вход логического элемента Э1. Таким образом, на каждом входе Э1 имеется логическая единица. Следовательно, Э1 открыт и напряжение на его выходе соответствует логическому нулю. Напряжение на конденсаторе C также близко к нулю.

При поступлении на вход отрицательного импульса, соответствующего нулю, на выходе элемента Э1 устанавливается логическая единица, соответствующая напряжению высокого уровня. Начинается зарядка конденсатора C . Ток зарядки протекает от выхода элемента Э1 через конденсатор C и резистор R . На резисторе создается положительное напряжение, которое в виде логической единицы поступает на входы элемента Э2 и открывает его. На выходе элемента Э2 образуется низкое напряжение (логический ноль), которое передается на второй вход элемента Э1 и поддерживает его в закрытом состоянии после прекращения действия входного импульса.

При $U_{\text{вых2}} > U_{\text{пор}}$ на входах элемента Э1 будет логическая единица, Э1 откроется, на его выходе будет напряжение логического нуля. Начнется разрядка конденсатора C , напряжение на входах Э2 станет меньше порогового, Э2 закроется до прихода следующего импульса. Таким образом, на выходе будет сформирован прямоугольный импульсный сигнал.

Блокинг-генераторы

Блокинг-генераторы предназначены для формирования импульсов тока или напряжения прямоугольной формы преимущественно малой длительности. Они находят применение в схемах формирования пилообразного тока для формирования развертки электронного луча по экрану осциллографа. На основе блокинг-генератора выполняют формирователи управляющих импульсов в цифровых системах.

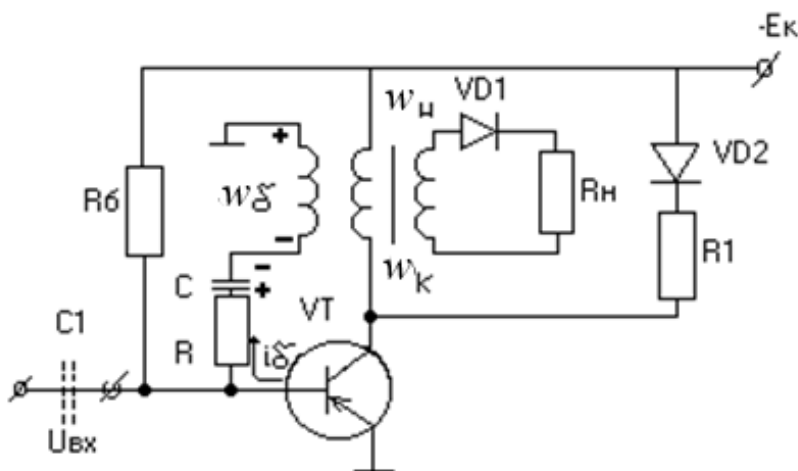


Рисунок 20.13 Схема блокинг-генератора на транзисторе с ОЭ

По принципу построения блокинг-генераторы представляют собой однокаскадные транзисторные усилители с глубокой положительной обратной связью, которая осуществляется импульсным транзистором. Схема блокинг-генератора, выполненная на транзисторе с ОЭ, показана на рис. 20.13. Цепь положительной обратной связи (ПОС) осуществлена с помощью вторичной обмотки w_6 трансформатора Tr , конденсатора C и резистора R , ограничивающего ток базы. Резистор R_6 создает контур разряда конденсатора на этапе закрытого состояния транзистора.

Выходной сигнал снимают либо непосредственно с коллектора транзистора, либо с дополнительной нагрузочной обмотки w_n трансформатора Tr , которая связана с коллекторной обмоткой w_k трансформатора. Диод $VD1$ исключает прохождение в нагрузку импульса напряжения отрицательной полярности, который возникает при запираании транзистора VT . Диод $VD2$ и сопротивление $R1$ выполняют функции защиты транзистора от перенапряжения.

Блокинг-генератор может работать в следующих режимах:

- автоколебаний;
- ждущем;
- синхронизации.

В автоколебательном режиме в начальный момент времени транзистор VT закрыт, напряжение $U_k = -E_k$, напряжение на обмотке трансформатора, на базе транзистора U_6 и на нагрузке U_n равны нулю. Закрытое состояние VT создается напряжением на конденсаторе C , который перезаряжается по цепи $w_6 - C - R - R_6 - (-E_k)$. Когда напряжение на C становится равным 0, то транзистор открывается и напряжение на коллекторе U_k уменьшается, что вызывает появление напряжения на коллекторной обмотке w_k . Напряжение на w_k трансформируется в w_6 с такой полярностью, которая приводит в результате ПОС к увеличению базового тока i_6 , что вызывает увеличение коллекторного тока i_k , снижение напряжения на коллекторе и дальнейшее повышение напряжения на w_k и w_6 . Процесс завершается переходом транзистора в режим насыщения и называется прямым блокинг-процессом (рис. 20.14).

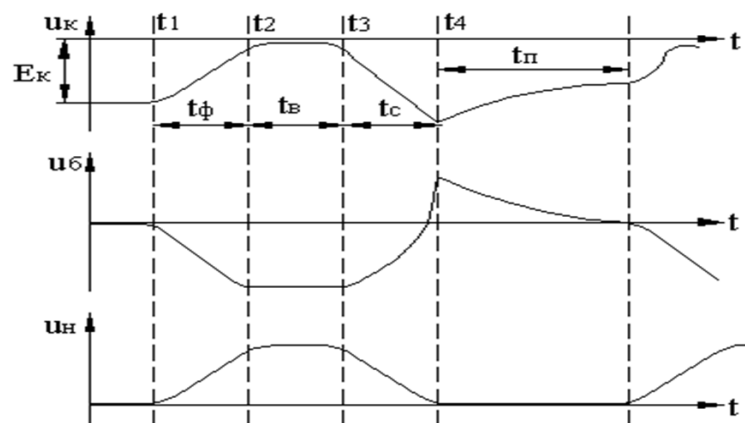


Рисунок 20.14 Временные диаграммы блокинг-генератора

Однако по мере заряда конденсатора, ток базы i_b уменьшается, вследствие чего уменьшается степень насыщения транзистора. Транзистор начинает закрываться и вместе с этим заканчивается формирование импульса напряжения.

Переход транзистора в закрытое состояние происходит за счет ПОС также лавинообразно и называется обратным блокинг-процессом.

При работе блокинг-генератора в режиме синхронизации в базовую цепь транзистора через конденсатор $C1$ подают входные импульсы отрицательной полярности. Синхронизирующие импульсы осуществляют отпирание транзистора раньше момента естественного спада напряжения на его базе до нуля, в результате чего частота импульсов блокинг-генератора равна частоте следования импульсов синхронизации

Если блокинг-генератор работает в ждущем режиме, то на базу транзистора подается начальное дополнительное напряжение смещения, в результате чего транзистор остается закрытым до подачи входного импульса.

Генераторы линейно изменяющегося напряжения

Генераторы линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН) служат для создания развертки электронного луча по экрану осциллографа, получение временных задержек импульсных сигналов, модуляции импульсов по длительности и т.д.

Линейно изменяющееся напряжение (ЛИН)- это импульсное напряжение, которое в течение некоторого времени изменяется практически по линейному закону, а затем возвращается к исходному уровню (рис. 20.15).

Параметры ЛИН:

- максимальное значение амплитуды U_m ;
- длительность рабочего хода t_p ;
- время обратного хода t_0 ;
- коэффициент нелинейности ε .

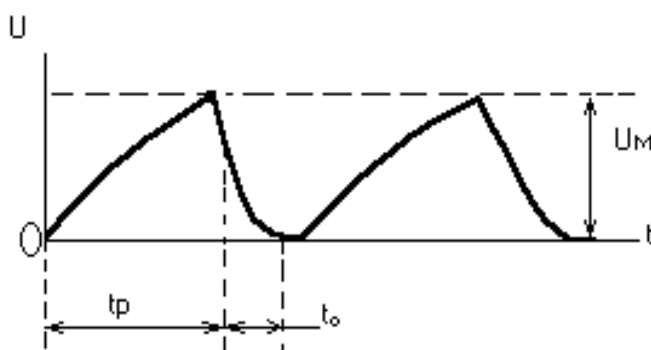


Рисунок 20.15 Вид линейно изменяющегося напряжения

Формирование линейно изменяющегося напряжения (ЛИН) (или пилообразного) основано на чередовании во времени процессов заряда и разряда конденсатора. Схема ГЛИН показана на рис. 20.16.

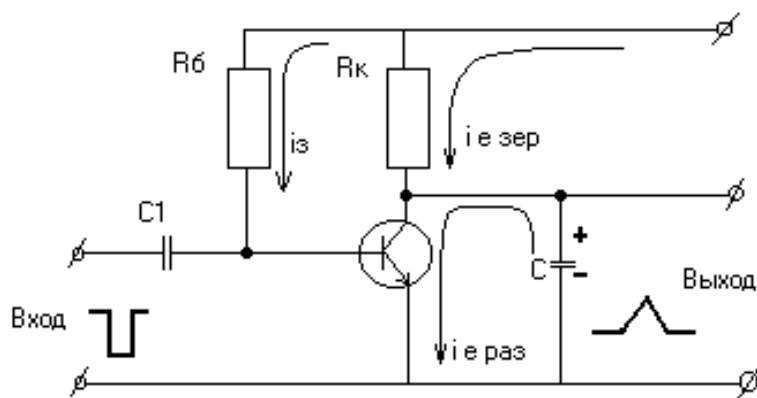


Рисунок 20.16 Схема ГЛИН

На транзисторе VT собран ключ, управляемый прямоугольными импульсами отрицательной полярности. В исходном состоянии транзистор насыщен (ключ замкнут), что обеспечивается выбором соотношения сопротивлений резисторов $R_б$ и $R_к$.

При воздействии входного импульса длительностью t_p транзистор закрывается (ключ разомкнут) и конденсатор C заряжается от источника $+E_k$ через резистор $R_к$ (рис. 20.17). Напряжение на конденсаторе изменяется по экспоненте $U_c = E_1 (1 - e^{-t/(RC)})$. По окончании входного импульса транзистор переходит в режим насыщения (ключ замкнут), и конденсатор быстро разряжается через промежуток коллектор-эмиттер. Используя начальный участок экспоненты, линейность которого достаточно высока, можно получить импульсы с малым коэффициентом нелинейности.

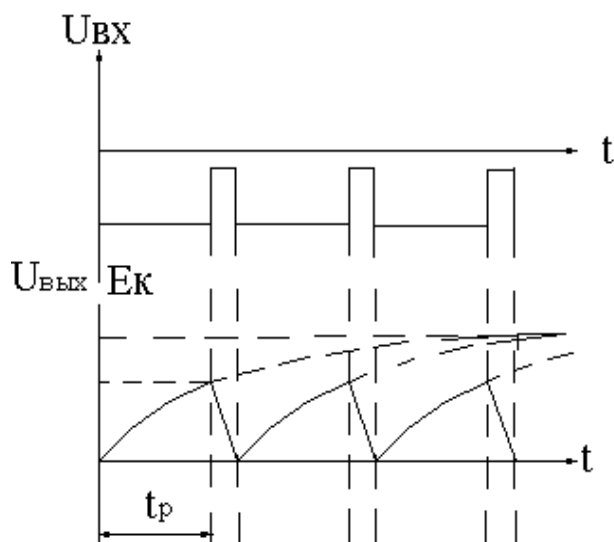


Рисунок 20.17 Временные диаграммы $U_{вх}$ и $U_{вых}$ ГЛИН

ПРАКТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Лабораторная работа №1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ И ТИРИСТОРОВ

Ц е л ь р а б о т ы: выяснение механизма образования n - p перехода; снятие вольтамперных характеристик выпрямительного диода и стабилитрона; ознакомление с принципом действия тиристора и снятие его основных характеристик.

Общие сведения

К полупроводниковым относятся материалы, которые при комнатной температуре имеют удельное сопротивление $\rho = 10^{-3} \dots 10^{10}$ Ом·см, зависящее от температуры, освещенности, ионизирующего излучения, электрического поля и др.

Для изготовления полупроводниковых приборов применяют простые полупроводниковые вещества - германий, кремний, селен - и некоторые химические соединения, например, арсенид галлия $GaAs$, антимонид индия $InSb$, фосфид индия InP , карбид кремния SiC .

Полупроводники имеют кристаллическую структуру, которая однородна при температуре абсолютного нуля. По мере нагрева часть валентных связей нарушается вследствие тепловых колебаний в кристаллической решетке, что приводит к одновременному образованию свободных электронов и незаполненных связей (дырок). Генерация пар

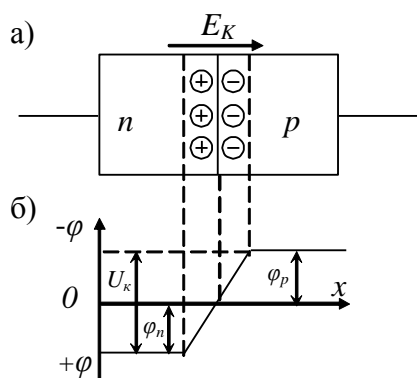


Рисунок 1.1
 P - N переход

носителей заряда может происходить также под действием света, электрического поля, излучения и др. Электропроводность собственного полупроводника, обусловленную парными носителями заряда (электронами и дырками), называют **с о б с т в е н н о й**. Вводя в собственный полупроводник примеси, получают **п р и м е с н у ю** электропроводность. Донорные примеси, атомы которых отдают электроны, образуют полупроводники с преобладающей электронной электропроводностью (n -типа). Полупроводники с преобладающей дырочной

электропроводностью называют полупроводниками p -типа, а соответствующие примеси - акцепторами.

Область на границе контакта двух полупроводников с противоположным типом электропроводности называется **э л е к т р о н н о - д ы р о ч н ы м** или n - p -переходом. Переход обладает несимметричной проводимостью, т. е. имеет нелинейное сопротивление. Работа большинства полупроводниковых приборов (диодов, тиристоров и др.) основана на использовании свойств n - p -переходов.

Рассмотрим процессы в n - p -переходе при отсутствии внешнего источника напряжения (рис.1.1). Так как носители заряда совершают беспорядочное тепловое движение, то происходит их диффузия из одного полупроводника в другой. Концентрация электронов в n -слое больше, чем в p -слое, и часть электронов перейдет из n -слоя в p -слой. Одновременно наблюдается диффузионный переход дырок из p -слоя в n -слой. В результате в n -слое остается нескомпенсированный объемный заряд положительных ионов (в основном донорной примеси), а в p -слое - нескомпенсированный объемный заряд отрицательных ионов акцепторной примеси. Между образовавшимися объемными зарядами возникает контактная разность потенциалов $U_k = \varphi_n - \varphi_p$ и электрическое поле напряженностью E_k . На потенциальной диаграмме n - p -перехода (рис.1.1 б) за нулевой потенциал принят потенциал граничного слоя. В n - p -переходе возникает потенциальный барьер, препятствующий диффузионному перемещению носителей заряда. Высота барьера равна контактной разности потенциалов и обычно составляет десятые доли вольта. На рис.1.1б изображен барьер для дырок, стремящихся за счет диффузии перемещаться из области p в область n .

Таким образом, в n - p -переходе вследствие ухода электронов и дырок вглубь p - и n -областей образуется обедненный зарядами слой, называемый **запирающим** и обладающий большим сопротивлением в сравнении с сопротивлением остальных объемов n - и p -областей.

Если источник внешнего напряжения положительным полюсом подключить к полупроводнику p -типа и отрицательным к n -типа (прямое включение), то электрическое поле, создаваемое в n - p -переходе прямым напряжением $U_{пр}$, действует навстречу контактной разности потенциалов U_k . Потенциальный барьер понижается до величины $U_k - U_{пр}$, уменьшаются толщина запирающего слоя и его сопротивление $R_{пр}$.

Если полярность внешнего источника изменить на обратную, то потенциальный барьер возрастает до величины $U_k + U_{обр}$. В этом случае через переход могут пройти только неосновные носители: электроны из p -области в n -область и дырки во встречном направлении. Так как концентрация основных носителей заряда на несколько порядков выше концентрации неосновных, то прямые токи на несколько порядков больше обратных. Электронно-дырочный переход обладает **выпрямляющими** свойствами, которые используются для создания диодов.

Диодом называют полупроводниковый прибор с одним n - p -переходом и двумя внешними выводами. По назначению диоды делят на выпрямительные, высокочастотные, импульсные, стабилитроны и т.д. Их изготавливают на основе германия или кремния.

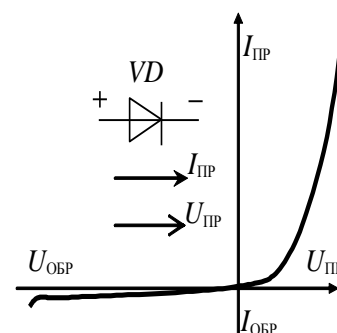


Рисунок 1.2
ВАХ диода

Выпрямительные диоды предназначены для преобразования переменного тока низкой частоты в постоянный ток. Вольтамперная характеристика (ВАХ) выпрямительного диода, его условное графическое изображение и буквенное обозначение даны на рис.1.2. Основные параметры выпрямительного диода: предельно допустимый постоянный ток диода $I_{пр.мах}$ и максимально допустимое обратное напряжение $U_{обр.мах}$.

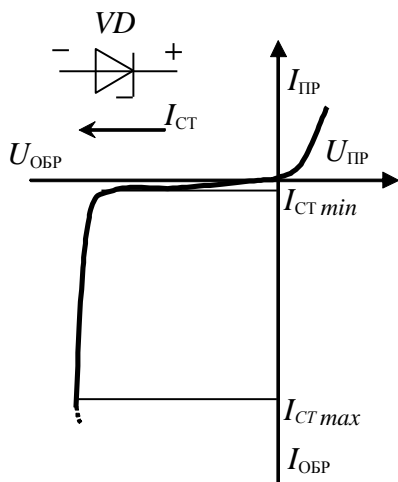


Рисунок 1.3
ВАХ стабилитрона

С т а б и л и т р о н представляет собой кремниевый полупроводниковый диод, который нормально работает при электрическом пробое $n-p$ -перехода. При этом напряжение на диоде незначительно зависит от протекающего тока. Электрический пробой не вызывает разрушения перехода, если ограничить ток до допустимой величины. Стабилитроны применяют для стабилизации постоянного напряжения. ВАХ стабилитрона и его условное графическое обозначение приведены на рис.1.3. Основные параметры стабилитрона: напряжение стабилизации $U_{ст.ном}$, минимальный $I_{ст.min}$ и максимальный $I_{ст.мах}$ токи стабилизации, максимальная мощность $P_{ст.мах}$.

Т и р и с т о р о м называют полупроводниковый прибор с тремя или более $n-p$ -переходами и двумя (д и н и с т о р) или тремя (т р и н и с т о р) выводами. Он может находиться в одном из двух устойчивых состояний: низкой проводимости (закрит) или высокой проводимости (открит). Структура, условное графическое и буквенное обозначения тиристора, его вольтамперная характеристика даны на рис.1.4а, б, в.

Основу прибора составляет кристалл кремния, в котором созданы четыре слоя с разными типами электропроводности. Внешний p -слой называют анодом (А), внешний n -слой - катодом (К), а два внутренних слоя - базами. Одна из баз имеет вывод - управляющий электрод (У).

При прямом включении (анод положителен по отношению к катоду) переходы П1 и П3 смещены в прямом направлении, а переход П2 - в обратном направлении. До тех пор, пока П2 закрит, прямой ток практически равен нулю (участок oa характеристики рис. 1.4в). При некотором значении прямого напряжения, равном $U_{вкл.мах}$, за счет перераспределения зарядов в области баз переход П2 открывается (точка a). Сопротивление его быстро уменьшается (участок ab), и тиристор работает на участке $бв$ характеристики, которая подобна ВАХ диода.

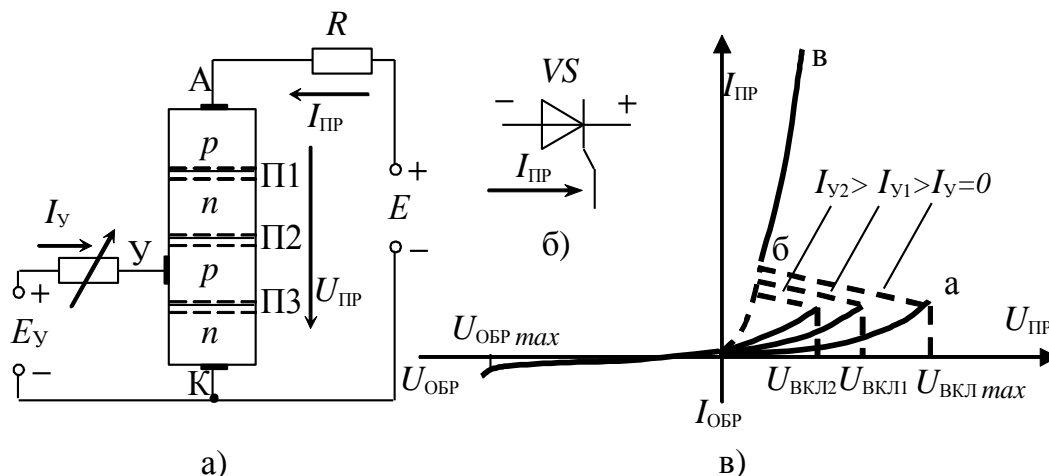


Рисунок 1.4 Тиристор: структура(а),
Обозначение (б), ВАХ (в)

Напряжение включения $U_{\text{вкл.max}}$ можно уменьшить введением добавочных носителей заряда в любой из слоев, прилегающих к переходу П2. Добавочные носители заряда на рис.1.4а вводятся в слой p от вспомогательной управляющей цепи с независимым источником E_y . При увеличении тока управления I_y характеристика (рис.1.4 в) смещается влево (к естественной прямой ветви ВАХ диода). Тиристор остается во включенном состоянии, пока протекающий через него ток больше критического, называемого током удержания $I_{\text{уд}}$. Как только $I_{\text{пр}}$ станет меньше $I_{\text{уд}}$, тиристор закрывается.

Следует отметить, что после включения тиристора объемные заряды в области перехода П2 будут компенсированы основным током, если он больше тока $I_{\text{уд}}$, и тогда ток управления I_y не нужен. Поэтому для снижения потерь в тиристоре он управляется короткими импульсами I_y .

При обратном включении тиристора (анод отрицателен по отношению к катоду) закрыты два перехода П1 и П3, и тиристор тока не проводит. Во избежание пробоя необходимо, чтобы обратное напряжение было меньше $U_{\text{обр.max}}$.

Основные параметры, используемые при выборе тириستоров: предельно допустимый анодный ток в открытом состоянии тиристора $I_{\text{пр.max}}$, предельно допустимое обратное напряжение $U_{\text{обр.max}}$, предельно допустимое прямое напряжение в закрытом состоянии тиристора $U_{\text{пр.max}}$, ток удержания $I_{\text{уд}}$.

Маломощные тиристоры применяют в релейных схемах и маломощных коммутирующих устройствах. Мощные тиристоры используют в управляемых выпрямителях, инверторах и различных преобразователях.

Предварительное задание к эксперименту

Изучить устройство и принцип работы выпрямительного диода, стабилитрона, тиристора. Письменно дать обоснованный ответ на вопрос соответствующего варианта.

Таблица 1.1

| Вариант | В о п р о с |
|---------|--|
| 1 | Можно ли с помощью тока управления закрыть тиристор? |
| 2 | Рассчитайте прямое сопротивление выпрямительного диода, если $I_{пр}=0,05\text{A}$, $U_{пр}=0,67\text{В}$. Как изменится $R_{пр}$ при увеличении тока диода? |
| 3 | Можно ли с помощью тока управления включить тиристор при анодном напряжении, практически равном нулю? |
| 4 | Рассчитайте статическое сопротивление стабилитрона, если $U_{ст}=4\text{В}$, $I_{ст}=0,05\text{A}$. Как изменится $R_{ст}$ при увеличении тока стабилитрона? |
| 5 | Нужно ли поддерживать ток управления после включения тиристора для дальнейшей его работы в открытом состоянии? |
| 6 | Рассчитайте сопротивление открытого тиристора при $U_{пр}=1\text{В}$, $I_{пр}=0,19\text{A}$. Как изменится $R_{пр}$ при увеличении тока тиристора? |
| 7 | Как следует изменить ток управления тиристора для уменьшения напряжения его включения? |
| 8 | Что такое ток удержания тиристора? Закроется ли тиристор при уменьшении прямого тока, если $I_{пр}>I_{уд}$? |

Порядок выполнения эксперимента

1. Изучить лабораторный стенд по схеме рис.1.5. Установить регулятор потенциометра $R2$ в крайнее левое положение, переключателем П2.1 подключить выпрямительный диод.

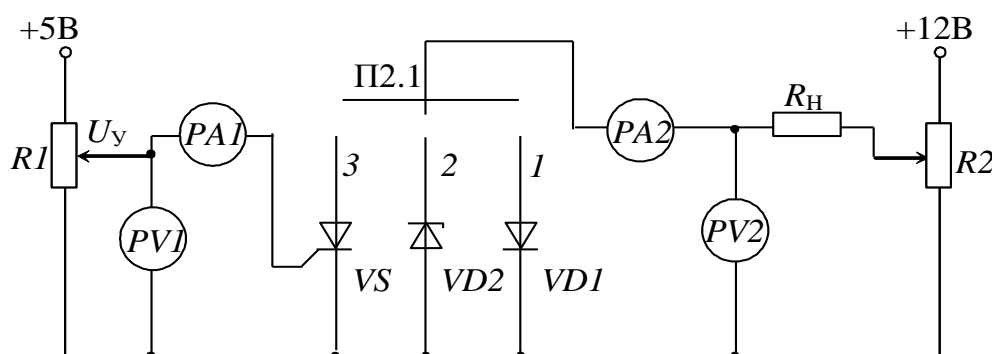


Рисунок 1.5

2. Включить цепь под напряжение с помощью шнура питания стенда и, регулируя напряжение потенциометром $R2$, снять ВАХ диода в прямом направлении $I_{пр}(U_{пр})$. Результаты измерений записать в табл.1.2.

ТАБЛИЦА 1.2

| | | | | | | |
|----------------------------|--|--|--|--|--|--|
| $I_{\text{пр}}, \text{мА}$ | | | | | | |
| $U_{\text{пр}}, \text{В}$ | | | | | | |

3. Проверить экспериментом ответ на вопрос предварительного задания (вариант 2).

4. Установить потенциометр $R2$ в исходное положение (п.1), затем подключить стабилитрон и снять обратную ветвь ВАХ стабилитрона $I_{\text{обр}}(U_{\text{обр}})$. Измерения записать в табл.1.3.

5. Проверить экспериментом ответ на вопрос предварительного задания (вариант 4).

ТАБЛИЦА 1.3

| | | | | | | |
|-----------------------------|--|--|--|--|--|--|
| $I_{\text{обр}}, \text{мА}$ | | | | | | |
| $U_{\text{обр}}, \text{В}$ | | | | | | |

6. Снять характеристику включения тиристора $U_{\text{вкл}}(I_y)$. Для этого переключателем подключить тиристор, регуляторы $R1$, $R2$ установить в крайние левые положения. Регулируя анодное напряжение от 0 до 12 В ступенями через 2 В и медленно увеличивая ток управления I_y до момента включения тиристора, зафиксировать и записать в табл.1.4 значения тока управления. Построить характеристику включения тиристора $U_{\text{вкл}}(I_y)$.

ТАБЛИЦА 1.4

| | | | | | | | |
|----------------------------|---|---|---|---|---|----|----|
| $U_{\text{вкл}}, \text{В}$ | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 |
| $I_y, \text{мА}$ | | | | | | | |

7. Снять характеристику прямой передачи тока тиристора $I_{\text{пр}}(I_y)$: потенциометром $R1$ установить ток $I_y=0$, а потенциометром $R2$ - напряжение $U_{\text{пр}}=8\text{В}$, затем увеличивать ток управления до момента включения тиристора, записать значения I_y , $I_{\text{пр}}$. Увеличивая далее I_y до 10 мА, убедиться в постоянстве анодного тока. Построить график $I_{\text{пр}}(I_y)$.

8. Снять вольтамперную характеристику тиристора $I_{\text{пр}}(U_{\text{пр}})$, установив ток управления, при котором открывается тиристор (см. п.6). Результаты измерений представить таблицей 1.5. Построить ВАХ тиристора.

ТАБЛИЦА 1.5

| | | | | | | |
|----------------------------|--|--|--|--|--|--|
| $I_{\text{пр}}, \text{мА}$ | | | | | | |
| $U_{\text{пр}}, \text{В}$ | | | | | | |

9. Проверить экспериментом ответы на вопросы предварительного задания (варианты 1,3,5...8).

Содержание отчета

Цель работы; ответ на вопрос предварительного задания; схема исследований (рис.1.5); таблицы измерений; ВАХ выпрямительного диода, стабилитрона и тиристора; характеристики включения $U_{\text{вкл}}(I_y)$ и прямой передачи $I_{\text{пр}}(I_y)$ тиристора; сравнение прямых падений напряжений на диоде, стабилитроне и тиристоре; выводы о возможном практическом использовании выпрямительных диодов, стабилитронов и тиристоров.

Контрольные вопросы

1. Что представляет собой собственная и примесная электропроводности? 2. Что такое n - p -переход и как объяснить его вентильные свойства? 3. Чем обусловлена контактная разность потенциалов n - p -перехода? 4. Охарактеризуйте состояния n - p -перехода при прямом и обратном включении? 5. Поясните графики ВАХ диода и стабилитрона. Как влияет температура на ВАХ? 6. Каковы основные параметры диода, стабилитрона? 7. Поясните устройство и принцип работы тиристора, вид его ВАХ? 8. Каково влияние тока управления на работу тиристора? 9. Что такое динистор, тринистор, однооперационный и двухоперационный (запираемый) тиристоры? 10. Каковы основные параметры и характеристики тиристора? 11. Приведите примеры использования диодов, стабилитронов, тиристоров.

Лабораторная работа №2

ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО И ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРОВ

Ц е л ь р а б о т ы : изучение устройства и принципа работы транзисторов; снятие их статических характеристик в схемах с общим эмиттером и общим истоком, определение основных параметров; сравнительный анализ.

Общие сведения

Б и п о л я р н ы м т р а н з и с т о р о м называют полупроводниковый прибор с двумя n - p -переходами, образованными слоями полупроводникового материала n - p - n или p - n - p -типа. Он имеет три или более выводов, изготавливается на основе германия или кремния, обеспечивает усиление мощности электрических сигналов. На рис.2.1 приведены структурные схемы, условные графические и буквенные обозначения транзисторов n - p - n -типа (рис.2.1,а) и p - n - p -типа (рис.2.1,б).

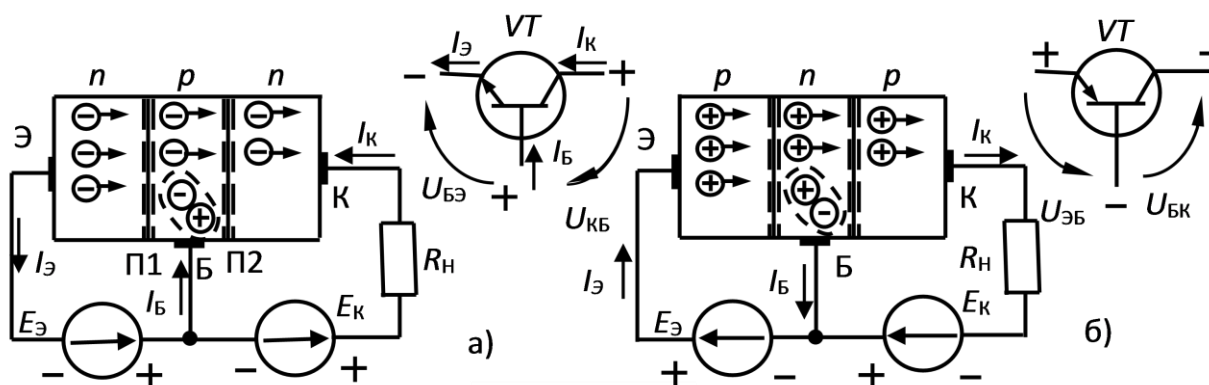


Рисунок 2.1 Биполярный транзистор

Средний слой кристалла называют б а з о й . Ее толщина мала, составляет несколько микрометров и концентрация примесей здесь значительно меньше, чем в соседних слоях. Крайние слои называют э м и т т е р о м (Э) и к о л л е к т о р о м (К).

Для нормальной работы транзистора между его выводами должны быть включены источники питания. Если источники включены так, что оба перехода П1, П2 находятся под обратным напряжением, то токи транзистора практически равны нулю - этот режим называют о т с е ч к о й . Если переходы транзистора имеют прямое смещение, то их сопротивление мало, и транзистор можно рассматривать как узел цепи. Такой режим работы называют н а с ы щ е н и е м . В усилительном каскаде транзистор работает в а к т и в н о м р е ж и м е , при этом эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный - в обратном (рис.2.1). Прямосмещенный эмиттерный переход имеет небольшое сопротивление - несколько Ом. Коллекторный переход, при отсутствии инжекции из эмиттера, имеет очень большое сопротивление - несколько мегаОм, поэтому в цепь коллектора можно

включать нагрузку с большим сопротивлением, практически не изменяя тока коллектора.

Под действием источника $E_э$ основные носители заряда из эмиттера преодолевают $n-p$ -переход и попадают в область базы, где частично рекомбинируют с основными носителями заряда базы, образуя ток базы $I_б$. Так как концентрация дырок (для $n-p-n$ -типа) и электронов (для $p-n-p$ -типа) в базе мала, то не все инжектированные из эмиттера заряды рекомбинируют. Большинство зарядов, вследствие диффузии и поля источника $E_к$, преодолевает коллекторный переход и образуют ток коллектора.

Коэффициент передачи тока эмиттера

$$\alpha = \Delta I_к / \Delta I_э \text{ при } U_{кб} = \text{const.}$$

В современных транзисторах база очень тонкая и $\alpha = 0,99$ и больше.

Когда $I_э = 0$, то будет небольшой ток через коллекторный переход $I_{к0}$, обусловленный движением неосновных носителей заряда.

Рассмотренная на рис.2.1 схема включения транзистора называется схемой с общей базой (ОБ), так как база является общим электродом для входной и выходной цепей. Она обеспечивает усиление сигнала по напряжению и мощности, но ток в нагрузке будет меньше, чем входной ток источника сигнала.

Наиболее часто используется в электронных устройствах схема включения транзистора с общим эмиттером (ОЭ) - рис.2.2,а. Входным здесь является ток базы $I_б$, а выходным - ток коллектора $I_к$.

Коэффициент передачи тока базы схемы ОЭ

$$\beta = \Delta I_к / \Delta I_б \text{ при } U_{кэ} = \text{const}; \beta = \alpha / (1 - \alpha) \gg 1.$$

Эта схема обеспечивает усиление тока и напряжения сигнала и максимальное усиление мощности.

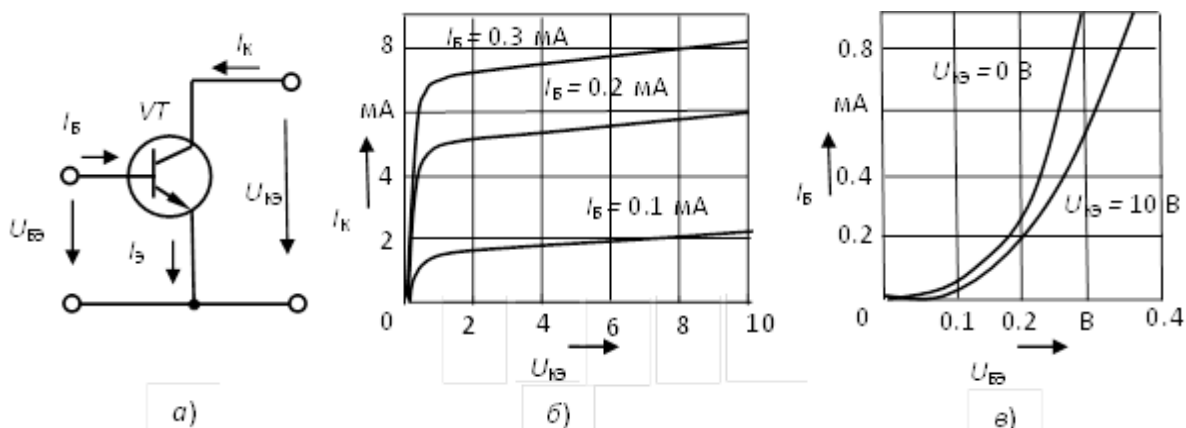


Рисунок 2.2 Биполярный транзистор включенный по схеме с общим эмиттером

Основными характеристиками транзисторов ОЭ являются

- 1) выходные - $I_к(U_{кэ})$ при $I_б = \text{const}$ (рис.2.2, б),
- 2) входные - $I_б(U_{бэ})$ при $U_{кэ} = \text{const}$ (рис.2.2, в).

Они определяют связь между постоянными составляющими токов и напряжений, дают возможность выбрать наилучший режим работы, оценить нелинейные искажения усиливаемого сигнала.

Для расчета цепей с биполярными транзисторами в настоящее время используются h -параметры: транзистор представляют четырехполюсником и записывают уравнения четырехполюсника в h -параметрах. Коэффициенты четырехполюсника (h -параметры) выражаются следующим образом:

$h_{11} = \Delta U_{бэ} / \Delta I_б$ при $U_{кэ} = const$ - входное сопротивление $R_{вх}$, Ом;

$h_{12} = \Delta U_{бэ} / \Delta U_{кэ}$ при $I_б = const$ - безразмерный коэффициент обратной связи по напряжению;

$h_{21} = \Delta I_к / \Delta I_б$ при $U_{кэ} = const$ - безразмерный коэффициент передачи тока (β);

$h_{22} = \Delta I_к / \Delta U_{кэ}$ при $I_б = const$ - выходная проводимость ($1/R_{вых}$), См.

h -параметры приводятся в справочниках, а также могут быть определены по семейству входных и выходных характеристик транзистора.

Биполярные транзисторы управляются током и потребляют заметную мощность от входной цепи. Указанного недостатка лишены полевые транзисторы (ПТ) - это полупроводниковые приборы с каналом, ток в котором управляется электрическим полем. Принцип действия их основан на использовании носителей заряда только одного знака (электронов или дырок), поэтому их иначе называют у н и п о л я р н ы м и .

Главным достоинством ПТ является высокое входное сопротивление, т.е. они практически не потребляют ток из входной цепи. Кроме того, они более технологичны и дешевле, чем биполярные, обладают хорошей воспроизводимостью требуемых параметров.

По способу создания канала различают ПТ с управляющим n - p -переходом, со встроенным каналом и с индуцированным каналом. Последние два типа относятся к разновидностям МДП-транзисторов с изолированным затвором.

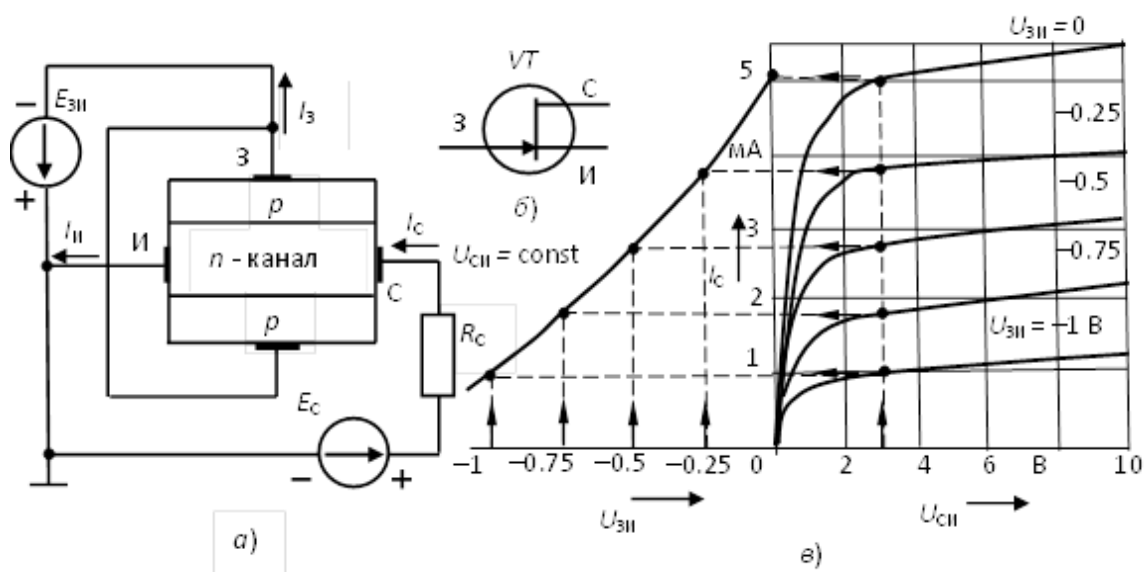


Рисунок 2.3 Полевой транзистор с управляющим p - n - переходом:
а) структура; б) обозначение; в) характеристики

У ПТ с управляющим n - p -переходом (рис.2.3,а) канал - это слой полупроводника n -типа (может быть p -типа), заключенный между двумя n - p -переходами. Канал имеет два вывода во внешнюю цепь: исток (И), из которого заряды выходят в канал, сток (С), в который заряды входят из канала. Слои p -типа соединены между собой и имеют вывод во внешнюю цепь, называемый затвором (З). Затвор служит для регулирования поперечного сечения канала. Особенность ПТ в том, что движение основных носителей заряда только одного знака происходит по каналу от истока к стоку, а не через переход, как в биполярном транзисторе.

Управляющее напряжение между З и И является обратным для обоих n - p -переходов ($U_{зи} < 0$). Оно вызывает вдоль канала равномерный слой, обедненный носителями заряда при $U_{си} = 0$. Изменяя $U_{зи}$, изменяют ширину n - p -переходов, тем самым регулируют сечение токопроводящего канала и его проводимость. Напряжение $U_{си} > 0$ вызывает неравномерность обедненного зарядами слоя, наименьшее сечение канала вблизи стока.

Управляющее действие затвора иллюстрируют передаточной (стоко-затворной) характеристикой $I_c(U_{зи})$ при $U_{си} = const$. На практике чаще используют выходные (стоковые) характеристики $I_c(U_{си})$ при $U_{зи} = const$, по которым строят передаточные (рис.2.3, в).

МДП - транзисторы со встроенным каналом имеют структуру металл - диэлектрик - полупроводник. У поверхности кристалла полупроводника (подложки p -типа) созданы две области n -типа и тонкая перемычка между ними - канал (рис.2.4,а). Области n -типа имеют выводы: И - исток и С - сток. Кристалл покрыт окисной пленкой диэлектрика SiO_2 , на которой расположен металлический затвор (З), электрически изолированный от цепи исток - сток. Подложка соединяется с истоком внутри прибора, либо имеет вывод во внешнюю цепь (П).

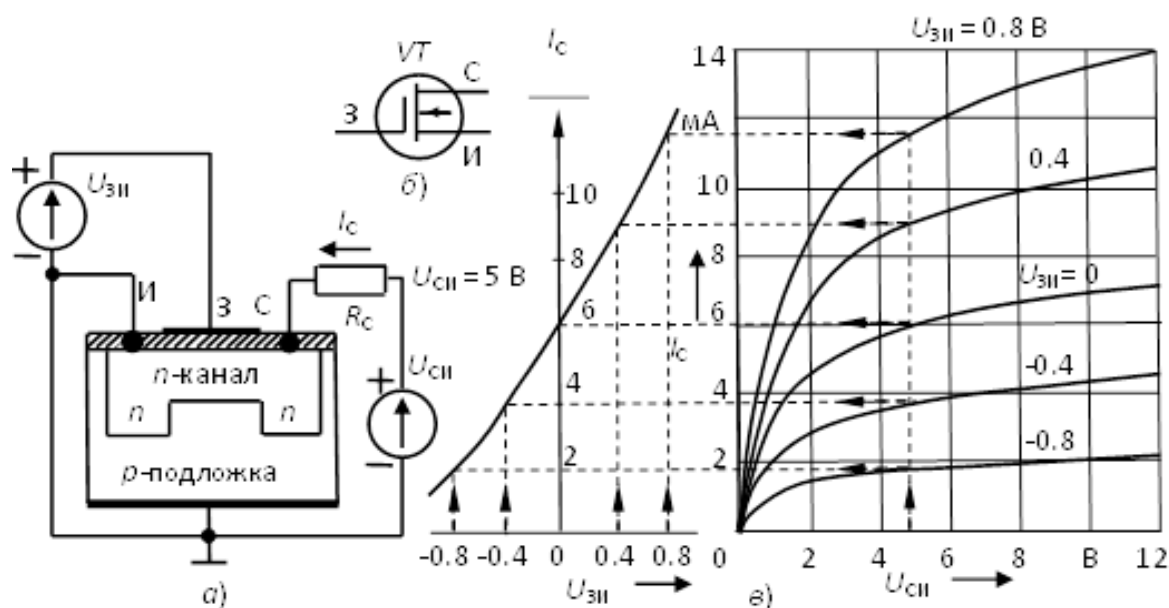


Рисунок 2.4 МДП транзистор со встроенным каналом

При отрицательном потенциале на затворе $U_{зи} < 0$ поле затвора выталкивает электроны из канала в p -подложку, исток и сток. Канал обедняется электронами, его сопротивление увеличивается и ток стока уменьшается. Такой режим называют режимом обеднения. Характеристики $I_c(U_{си})$ располагаются ниже кривой при $U_{зи} = 0$ (рис.2.4, в). Если на затвор подано $U_{зи} > 0$, то под действием поля затвора канал насыщается электронами из p -подложки, истока и стока - это режим обогащения.

Таким образом, МДП-транзистор со встроенным каналом может работать как в режиме обеднения, так и в режиме обогащения, что наглядно показывают его характеристики. Структура, условное графическое изображение, передаточная $I_c(U_{зи})$ при $U_{си} = const$ и стоковые $I_c(U_{си})$ при $U_{зи} = const$ характеристики ПТ со встроенным каналом даны на рис.2.4, а, б, в.

МДП - транзисторы с индуцированным каналом не имеют специально созданного канала между истоком и стоком, и при $U_{зи} = 0$ выходной ток $I_c = 0$. Канал индуцируется при положительном потенциале на затворе $U_{зи} > 0$ благодаря притоку электронов из p -подложки, истока и стока. Этот прибор работает только в режиме обогащения.

Основными параметрами полевых транзисторов являются крутизна $S = \Delta I_c / \Delta U_{зи}$ при $U_{си} = const$ и внутреннее (выходное) сопротивление $R_i = \Delta U_{си} / \Delta I_c$ при $U_{зи} = const$. Иногда пользуются третьим параметром - коэффициентом усиления $\mu = \Delta U_{си} / \Delta U_{зи}$ при $I_c = const$; $\mu = SR_i$.

Предварительное задание к эксперименту

1. По характеристикам биполярного транзистора ОЭ (рис.2.2, б, в) определить заданный вариантом табл.2.1 параметр транзистора, указать размерность, пояснить физический смысл.

ТАБЛИЦА 2.1

| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------------------------------|-----------|------------------------------------|
| Параметр | h_{11} | h_{12} | h_{21} | h_{22} | $R_{вх}$ | $\beta = \Delta I_K / \Delta I_Б$ | $R_{вых}$ | $k_U = \Delta U_{кэ} / \Delta U_Б$ |
| $U_{си}, В$ | 5 | 3 | 10 | 4 | 6 | 4,5 | 7 | 5,5 |

2. По стоковой характеристике полевого транзистора (рис.2.4, в) построить передаточную характеристику $I_c(U_{зи})$ при заданном в табл.2.1 напряжении $U_{си}$. Определить крутизну S , внутреннее сопротивление R_i при $U_{зи} = 0$ и коэффициент усиления μ .

3. Сравнить свойства биполярного и полевого транзисторов.

Порядок выполнения эксперимента

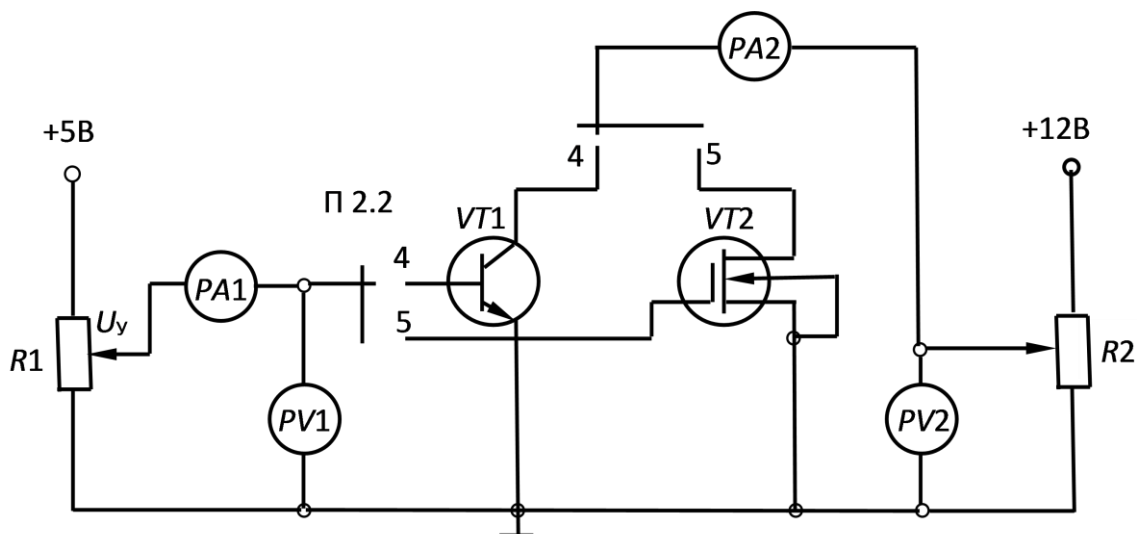


Рисунок 2.5 Схема экспериментальной установки

1. Подготовить схему рис.2.5 для исследования биполярного транзистора $VT1$: регуляторы $R1$ и $R2$ установить в крайние левые положения, переключатель П2 установить в положение 4. После проверки преподавателем включить схему к источнику напряжения.

2. Снять семейство выходных (коллекторных) характеристик транзистора $I_k(U_{кэ})$ при $I_b = const$. Для этого тумблер управляющего напряжения включить в положение «+», регулятором $R1$ установить значение I_b согласно табл. 2.2 и, изменяя регулятором $R2$ напряжение $U_{кэ}$ от 0 до 8...10 В, записать значения тока коллектора I_k в табл.2.2.

Проверить работу транзистора при $I_b = 0$.

ТАБЛИЦА 2.2

| $U_{кэ}, \text{В}$ | | 0 | 0,2 | 0,5 | 1,0 | 2,0 | 5,0 | 8...10 |
|-------------------------|--------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|--------|
| $I_k, \text{мА}$ при | $I_b=0,1\text{мА}$ | | | | | | | |
| | $I_b=0,2\text{мА}$ | | | | | | | |
| | $I_b=0,3\text{мА}$ | | | | | | | |
| | $I_b=0,4\text{мА}$ | | | | | | | |

3. Снять семейство входных характеристик $I_b(U_{бэ})$ при $U_{кэ} = 0$ и при $U_{кэ}=8...10 \text{ В}$. Для этого регулятором $R2$ установить напряжение $U_{кэ}$ и, поддерживая его неизменным, изменять регулятором $R1$ ток базы согласно табл.2.3. Значения напряжения $U_{бэ}$ записать в табл.2.3.

ТАБЛИЦА 2.3

| $I_b, \text{мА}$ | | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,6 |
|----------------------------|-------------------|---|-----|-----|-----|-----|
| $U_{бэ}, \text{мВ}$ при | $U_{кэ} = 0$ | | | | | |
| | $U_{кэ} = 8...10$ | | | | | |

4. Регуляторы $R1$ и $R2$ установить в крайние левые положения. Переключатель П2.1 установить в положение 5 для исследования полевого транзистора VT2.

5. Снять семейство выходных (стоковых) характеристик МДП-транзистора $I_c(U_{си})$ при $U_{зи} = const$. С этой целью регулятором $R1$ поочередно установить заданные табл.2.4 значения напряжения $U_{зи}$ и, поддерживая $U_{зи} = const$, изменять регулятором $R2$ напряжение $U_{си}$ от 0 до 8...10В. Значения тока стока записать в табл.2.4 (во избежание повреждения транзистора ток стока не должен превышать 13 мА).

ТАБЛИЦА 2.4

| $U_{си}, В$ | | 0 | 0,2 | 0,5 | 1,0 | 2 | 3 | 4 | 6 | 8...10 |
|------------------|-------------------|---|-----|-----|-----|---|---|---|---|--------|
| $I_c, мА$ при | $U_{зи} = 0,8 В$ | | | | | | | | | |
| | $U_{зи} = 0,4 В$ | | | | | | | | | |
| | $U_{зи} = 0$ | | | | | | | | | |
| | $U_{зи} = -0,4 В$ | | | | | | | | | |
| | $U_{зи} = -0,8$ | | | | | | | | | |

6. Снять передаточные характеристики $I_c(U_{зи})$ при $U_{си} = const$. Для этого регулятором $R2$ установить заданные табл. 2.5 значения напряжения $U_{си}$ и, изменяя $U_{зи}$ согласно табл.2.5, записать значения тока стока.

ТАБЛИЦА 2.5

| $U_{зи}, В$ | | 0,8 | 0,4 | 0 | - 0,4 | - 0,8 |
|------------------|---------------------|-----|-----|---|-------|-------|
| $I_c, мА$ При | $U_{си} = 5 В$ | | | | | |
| | $U_{си} = 8...10 В$ | | | | | |

7. По результатам п.п.2, 3 и 5, 6 построить характеристики. По характеристикам п.п.2,3 определить параметр биполярного транзистора, заданный вариантом предварительного задания. По характеристикам п.п.5,6 определить крутизну S , внутреннее сопротивление R_i и коэффициент усиления μ полевого транзистора. Сравнить эти значения с полученными в предварительном задании.

Содержание отчета

Цель работы; расчет предварительного задания к эксперименту с вычерченными на миллиметровой бумаге графиками характеристик биполярного и полевого транзисторов (рис.2.2, б, в; 2.4, в); сравнительный анализ биполярного и полевого транзисторов; схема экспериментальной установки (рис.2.5); таблицы измерений; на графиках рис.2.2, б, в и 2.4, в нанести экспериментальные точки; зависимость $\beta(I_k)$ при $U_{кэ} = 10 В$; расчет максимального значения крутизны передаточной характеристики полевого транзистора при $U_{си}=10 В$.

Контрольные вопросы

1. Как образуется n - p -переход и каковы его свойства? 2. Каково устройство биполярного транзистора и принцип его работы в схеме с общей базой и с общим эмиттером? 3. Как изображают на схемах транзисторы n - p - n и p - n - p -типов? 4. Какова полярность напряжений между электродами транзисторов n - p - n и p - n - p типов? 5. Какие функции выполняет эмиттер и коллектор? 6. Объясните характер входных и выходных характеристик биполярного транзистора. 7. Почему запрещается отключать вывод базы при наличии напряжения на эмиттере и коллекторе? 8. Что представляет собой обратный ток коллекторного перехода? 9. Объясните физический смысл h -параметров транзисторов и как они определяются по входным и выходным характеристикам? 10. Почему коэффициент усиления по току β не остается постоянным при изменении тока эмиттера? 11. Каковы конструкции полевых транзисторов с n - p -переходом и с изолированным затвором? 12. Принцип действия полевых транзисторов, их основные характеристики и параметры. 13. Что такое напряжение отсечки полевого транзистора, как оно определяется? 14. Что такое ток насыщения транзистора и как он определяется? 15. Каковы преимущества полевых транзисторов перед биполярными?

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ С ФИЛЬТРАМИ

Ц е л ь р а б о т ы : изучение устройства, принципа действия и режимов работы однофазных выпрямителей и сглаживающих фильтров.

Общие сведения

В ы п р я м и т е л е м называют устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии источника переменного тока в электрическую энергию, потребляемую приемником постоянного тока. Такое преобразование необходимо в том случае, когда первичным источником электроэнергии является однофазная (трехфазная) сеть или автономный генератор переменного тока, а потребитель электроэнергии работает на постоянном токе.

Для потребителей постоянного тока мощностью до нескольких сотен ватт используют о д н о ф а з н ы е в ы п р я м и т е л и , подключаемые к однофазной сети переменного тока. Однофазные выпрямители, как правило, входят в состав и с т о ч н и к о в в т о р и ч н о г о э л е к т р о п и т а н и я (ИБЭ) радио- и телевизионных, измерительных, вычислительных электронных устройств, применяют для питания электродвигателей постоянного тока, зарядки аккумуляторных батарей и др.

Для потребителей постоянного тока мощностью более 1 кВт используют т р е х ф а з н ы е в ы п р я м и т е л и , подключаемые к промышленной трехфазной сети.

Структурная схема традиционного однофазного источника питания постоянного тока представлена на рис.3.1.

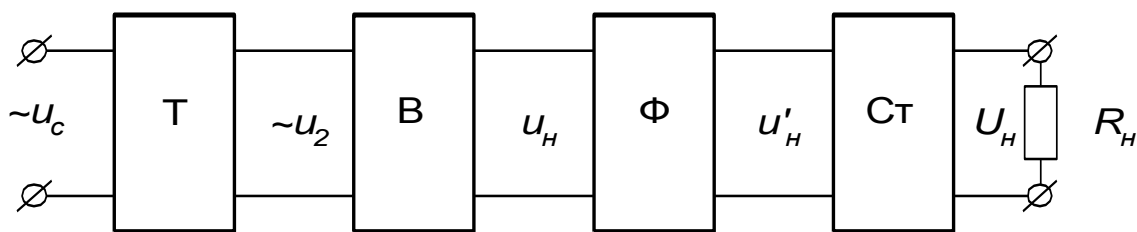


Рисунок 3.1 Структурная схема выпрямителя

Основным и обязательным элементом схемы является выпрямитель (В) на полупроводниковых вентилях. Принцип действия любого выпрямителя основан на односторонней проводимости вентилях, преобразующих переменный ток в пульсирующий ток постоянного направления. Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения после выпрямителя может быть включен сглаживающий фильтр (Ф), а при необходимости постоянства величины напряжения U_H на нагрузке - стабилизатор напряжения (Ст). Выпрямитель подключается к питающей сети переменного тока через трансформатор (Т) в

случае, если требуется преобразование уровня напряжения питающей сети U_c к необходимому уровню напряжения нагрузки U_n , а также для электрического разделения цепей.

Основными недостатками выпрямителей с трансформаторным входом являются большие габариты, масса трансформатора и сглаживающего фильтра. В малогабаритных ИВЭ электронной аппаратуры применяют схемы с бестрансформаторным входом, работа которых основана на многократном преобразовании электрической энергии. В таких схемах выпрямитель подключен непосредственно к питающей сети, а согласование уровней напряжений сети и нагрузки производится трансформатором на повышенной промежуточной частоте переменного тока, что позволяет значительно уменьшить габариты и массу трансформатора и фильтра.

В данной работе рассматриваются два вида неуправляемых однофазных выпрямителей:

о д н о п о л у п е р и о д н ы й и
д в у х п о л у п е р и о д н ы й м о с т о в о й . В неуправляемых выпрямителях нет возможности регулировать величину выпрямленного напряжения, потому что они выполняются на неуправляемых вентилях - п о л у п р о в о д н и к о в ы х д и о д а х . При анализе работы выпрямителей будем считать вентили и трансформатор идеальными, т.е. сопротивление диодов при прямом включении равно нулю, при обратном включении - бесконечности; для трансформатора пренебрегаем сопротивлением рассеяния и активным сопротивлением обмоток.

О д н о ф а з н ы й о д н о п о л у п е р и о д н ы й выпрямитель содержит один вентиль VD , включенный в цепь вторичной обмотки трансформатора T последовательно с нагрузкой R_n (рис.3.2,а). Временные диаграммы напряжений и токов, поясняющие работу выпрямителя на активную нагрузку без фильтра, представлены на рис.3.2,б. В первый полупериод напряжения вторичной обмотки трансформатора $u_2 = U_{2m} \sin(\omega t)$, когда оно положительно, диод VD открыт, т.к. на его аноде действует положительный потенциал. На этом интервале времени $(0 - T/2)$ через нагрузку будет протекать

ток $i_n = \frac{U_{2m}}{R_n} \sin(\omega t)$, являющийся для диода прямым током. При этом $u_b = 0$,

$u_n = u_2 = U_{2m} \sin(\omega t)$. На втором полупериоде напряжение u_2 становится отрицательным, и диод закрывается под действием отрицательного потенциала на аноде диода. На этом интервале времени $(T/2 - T)$ $i_n = 0$, $u_n = 0$, напряжение на вентиле $u_b = u_2 = U_{2m} \sin(\omega t)$ будет являться обратным напряжением диода.

В результате такой работы вентиля ток через нагрузку будет протекать в течение только одного полупериода переменного напряжения u_2 и вызывать на нагрузке периодическое несинусоидальное напряжение u_n , среднее значение которого может быть определено

$$U_H = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi U_{2m} \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{U_{2m}}{\pi} = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} = 0,45U_2.$$

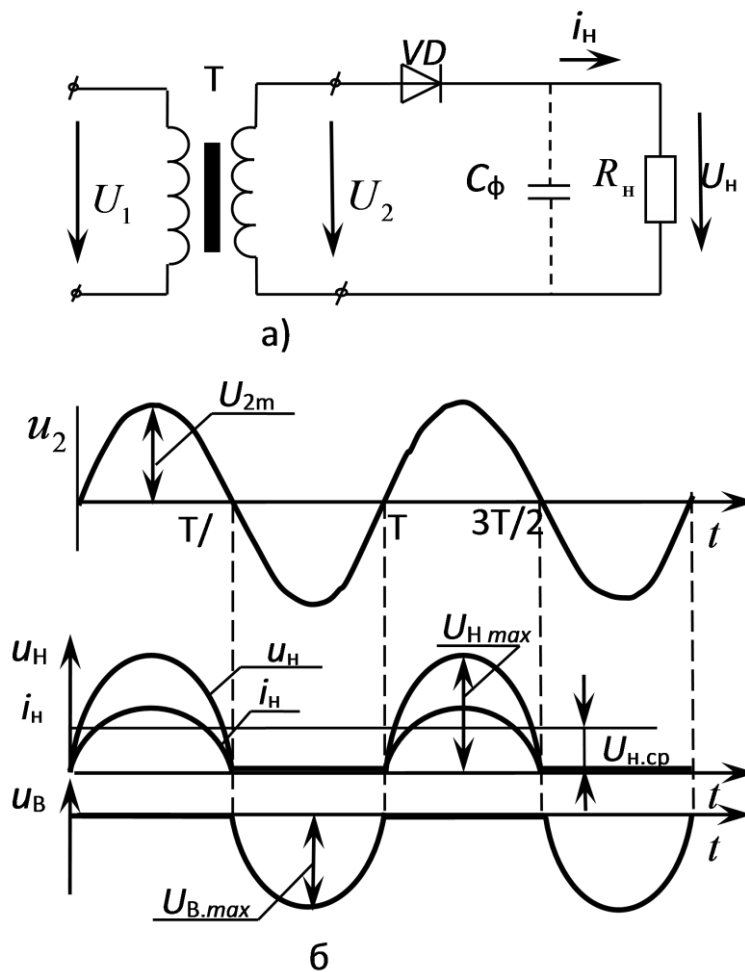


Рисунок 3.2 Однофазный однополупериодный выпрямитель

Средний ток через вентиль $I_{пр}$ равен среднему току нагрузки $I_{пр}=I_H$.

Максимальное напряжение на закрытом вентиле

$$U_{в\max} = U_{2m} = \sqrt{2}U_2 = \pi \cdot U_H = 3,14U_H.$$

Действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора

$$U_2 = \frac{\pi}{\sqrt{2}}U_H = 2,22U_H.$$

Действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора

$$I_2 = \frac{\pi U_H}{2R_H} \approx 1,57I_H.$$

Расчетная мощность трансформатора

$$S_T = (S_1 + S_2)/2 \approx S_2 = U_2 I_2 = 2,22U_H \cdot 1,57I_H \approx 3,5P_H.$$

Недостатками однополупериодного выпрямителя являются большой уровень пульсаций выпрямленного напряжения, вынужденное намагничивание сердечника трансформатора за счет постоянной составляющей тока вторичной обмотки, плохое использование трансформатора ($S_T = 3,5P_H$),

низкие коэффициенты использования вентилей ($K_I = I_{в.маx}/I_H = \pi$, $K_U = U_{в.маx}/U_H = \pi$).

Однополупериодные выпрямители применяются для питания маломощных усилителей, электронно-лучевых трубок и в высоковольтных установках для испытания изоляции.

Однофазный двухполупериодный мостовой выпрямитель состоит из четырех вентилей, включенных по мостовой схеме (рис.3.3,а). К одной диагонали моста подано переменное напряжение $u_2 = U_{2m} \sin(\omega t)$, к другой - подключена нагрузка R_H . Временные диаграммы напряжений и токов представлены на рис.3.3, б. В первый полупериод напряжения u_2 , когда потенциал на аноде $VD1$ положительный, диоды $VD1$ и $VD3$ открыты, и ток нагрузки протекает через $VD1$, R_H и $VD3$. В этом интервале времени $u_H = u_2$, диоды $VD2$ и $VD4$ закрыты и находятся под обратным напряжением. На втором полупериоде напряжение u_2 становится отрицательным, и диоды $VD1$ и $VD3$ будут теперь в закрытом состоянии находиться под обратным напряжением, а диоды $VD2$ и $VD4$ - открыты. Ток i_H будет протекать через $VD2$, $VD4$ и через нагрузку R_H в том же направлении, что и в предыдущий полупериод.

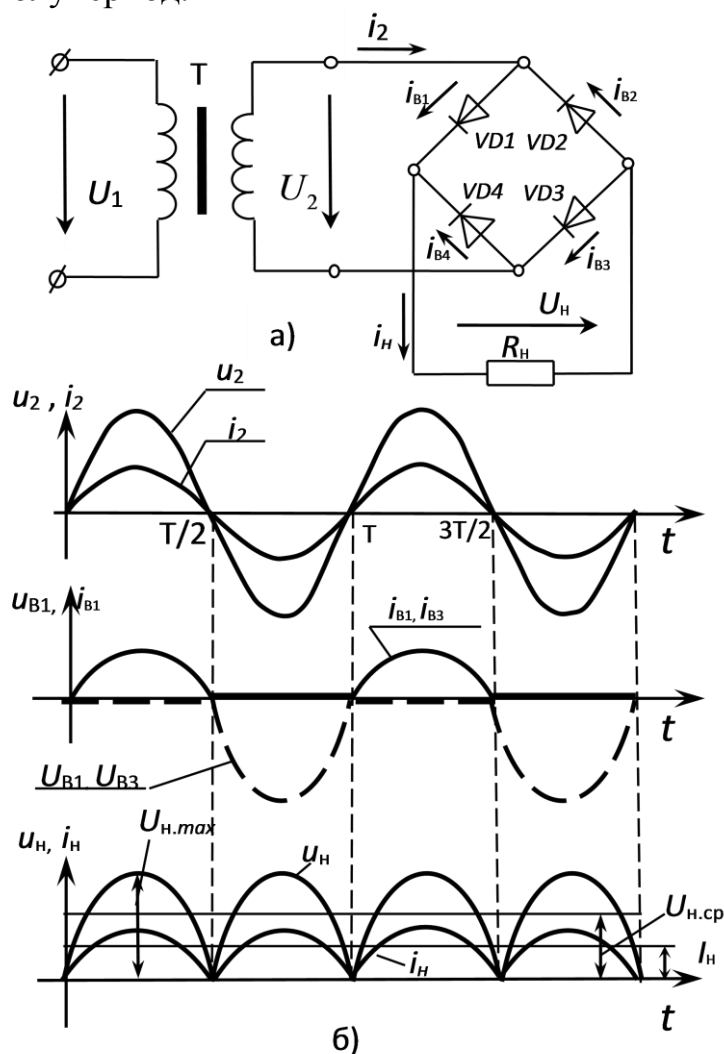


Рисунок 3.2 Однофазный мостовой выпрямитель

В результате такой попарной работы диодов ток в нагрузке будет протекать в течение двух полупериодов и вызывать напряжение u_n , среднее значение которого будет в два раза больше, чем при однополупериодном выпрямлении

$$U_n = 2 \cdot U_m / \pi = 0,9U_2; U_2 = 1,11U_n; I_2 = 1,11I_n.$$

Так как пары диодов проводят ток нагрузки поочередно по полпериода, то прямой ток вентиля будет равен $I_{пр} = 0,5I_n$.

Максимальное напряжение на закрытых вентилях $U_{в\max} = U_{2m} = 1,57U_n$.

Расчетная мощность трансформатора $S_T = S_1 = S_2 = U_2 I_2 = 1,23P_n$.

Д в у х п о л у п е р и о д н ы й выпрямитель в сравнении с однополупериодным имеет следующие преимущества: выпрямленный ток и напряжение вдвое больше, значительно меньший уровень пульсаций u_n , вентили выбираются по половине тока нагрузки, хорошо используется трансформатор и отсутствует вынужденное подмагничивание его сердечника. Мостовая схема имеет преобладающее применение в выпрямителях небольшой и средней мощности.

Для оценки пульсаций выпрямленного напряжения пользуются понятием к о э ф ф и ц и е н т а п у л ь с а ц и й q , который равен отношению амплитуды первой гармоники выпрямленного напряжения к среднему значению: $q = U_{1Гм} / U_{н.ср}$.

Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения применяют с г л а ж и в а ю щ и е ф и л ь т р ы . Основными элементами п а с с и в н ы х фильтров являются реактивные элементы: к о н д е н с а т о р ы и д р о с с е л и . На базе т р а н з и с т о р о в и о п е р а ц и о н н ы х усилителей выполняются более сложные а к т и в н ы е фильтры. Эффективность фильтра характеризуется к о э ф ф и ц и е н т о м с г л а ж и в а н и я , равным отношению коэффициентов пульсаций до и после установки фильтра

$$S = \frac{q_{вх}}{q_{вых}}.$$

Е м к о с т н о й фильтр состоит из конденсатора, подключаемого параллельно нагрузке, при этом напряжение $u_n = u_C$ определяется процессами заряда и разряда конденсатора. В однополупериодном выпрямителе конденсатор C_ϕ будет заряжаться через вентиль, если $u_2 > u_C$ (интервал времени $t_1 - t_2$ на рис. 3.4). Когда $u_2 < u_C$ ($t_2 - t_3$), вентиль закрыт, и конденсатор разряжается через сопротивление нагрузки R_n с постоянной времени $\tau_p = C_\phi R_n$; при этом $u_n = u_C = U_{C\max} e^{-t/\tau_p}$.

Достоинством емкостного фильтра является простота, повышенное напряжение на нагрузке и хорошее сглаживание при малых выходных токах. С увеличением тока нагрузки при уменьшении R_H уменьшается постоянная разряда конденсатора и возрастает коэффициент пульсаций на нагрузке. Емкостной фильтр целесообразно использовать при высокоомной нагрузке с малым значением выпрямленного тока.

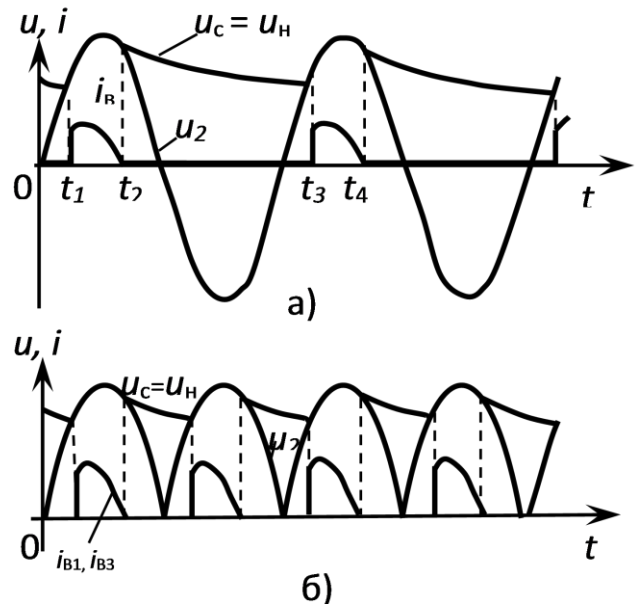


Рисунок 3.3 Принцип действия С- фильтра

И н д у к т и в н ы й фильтр состоит из индуктивной катушки (дресселя), включаемой последовательно с нагрузкой. Дрессель с индуктивностью L_Φ не оказывает сопротивления постоянной составляющей тока нагрузки, но подавляет переменные составляющие тока, для которых реактивное сопротивление катушки возрастает с увеличением частоты высших гармоник.

Недостатками индуктивных фильтров являются большие габариты и масса дресселя, поэтому применяются такие фильтры преимущественно в трехфазных выпрямителях большой и средней мощности при низкоомной нагрузке с большими значениями токов.

Для более эффективного сглаживания применяют составные или многосвязные фильтры, коэффициент сглаживания которых равен произведению коэффициентов сглаживания отдельных звеньев $S_\Phi = S_1 \cdot S_2 \cdot \dots \cdot S_n$. К составным фильтрам можно отнести Г- и П-образные LC-фильтры (табл. 3.1).

Расчет выпрямителя сводится к выбору вентиля, определению типа и параметров фильтра и трансформатора. Исходными данными к расчету являются напряжение $U_1 = U_c$ и частота f_1 питающей сети, напряжение U_H и мощность P_H нагрузки.

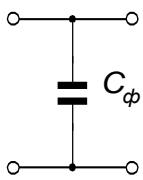
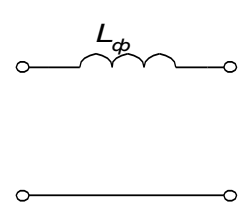
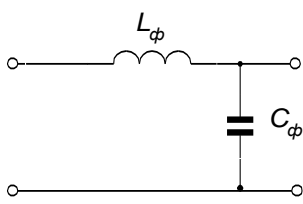
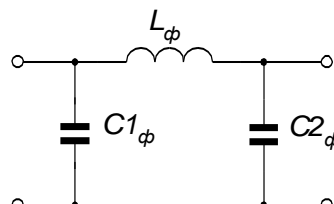
Для надежной работы вентилях их выбирают из условия, чтобы среднее значение тока через открытый вентиль $I_{пр}$ и максимальное обратное напряжение на закрытом вентиле $U_{вmax}$ не превышали допустимый прямой ток вентиля $I_{пр.max}$ и обратное максимальное напряжение $U_{обр.max}$

$$I_{пр} < I_{пр.max} \text{ и } U_{вmax} < U_{обр.max}.$$

$I_{пр}$ и $U_{вmax}$ рассчитываются из соотношений, приведенных в табл. 3.2 для соответствующей выпрямительной схемы, а $I_{пр.max}$ и $U_{обр.max}$ определяются из справочника для выбираемых вентилях.

Выбор трансформатора проводится по расчетной мощности S_T и коэффициенту трансформации $k_T = U_1/U_2$ (см. табл. 3.2).

ТАБЛИЦА 3.1

| Тип фильтра | Коэффициент Сглаживания фильтра | Условия Эффективной Работы |
|--|--|---|
| 1. Емкостной  | $S_C = 2\pi f_1 m R_H C_\phi$, где m – число пульсаций выпрямленного напряжения | $\frac{1}{\omega_{П(1)} C_\phi} \ll R_H$; $C_\phi \gg \frac{1}{\omega_{П(1)} R_H}$, где $\omega_{П(1)}$ – частота основной гармоники пульсаций; |
| 2. Индуктивный  | $S_L = \frac{2\pi f_1 m L_\phi}{R_H}$ | $R_\phi \ll R_H$ $\omega_{П(1)} L_\phi \gg R_H$ $L_\phi \gg \frac{R_H}{\omega_{П(1)}}$ |
| 3. Г-образный  | $S_\Gamma = S_L S_C =$ $= m^2 \omega^2 C_\phi L_\phi$, где $\omega = 2\pi f_1$; | $\omega_{П(1)} L_\phi = (5 \div 10) R_H$; $\frac{1}{\omega_{П(1)} C_\phi} \leq (0,1 \div 0,2) R_H$; |
| 4. П-образный  | $S_\Pi = S_{C1} S_\Gamma$ | Задаввшись $C_{\phi 1} = C_{\phi 2}$, определяют $S_{C1}, S_\Gamma = \frac{S_\Pi}{S_{C1}}$ |

При расчете фильтра известными являются: величина допустимого коэффициента пульсаций на нагрузке $q_H = q_{\text{вых}}$, коэффициент пульсаций выпрямителя $q = q_{\text{вх}}$, и соотношения определяемых параметров фильтра с его коэффициентом сглаживания (см. табл. 3.1).

ТАБЛИЦА 3.2

| Схема | $U_2/U_{H.c.p.}$ | I_2/I_H | I_{1kT}/I_H | S_T/P_H | $U_{\text{вmax}}/U_H$ | I_B/I_H | q | m |
|------------------------|------------------|-----------|---------------|-----------|-----------------------|-----------|-------|-----|
| Однополу- периодная | 2.22 | 1.57 | 1.21 | 3.5 | 3.14 | 1 | 1.57 | 1 |
| Мостовая | 1.11 | 1.11 | 1.11 | 1.23 | 1.57 | 0.5 | 0.667 | 2 |

Основной характеристикой выпрямителя является внешняя характеристика, которая показывает зависимость выходного напряжения от тока нагрузки $U_n = f(I_n)$. Приблизительный расчет выходного напряжения выпрямителя с учетом внутреннего падения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, вентилях и элементах фильтра может быть выполнен по формуле:

$$U_n = U_{н.ср.}^{XX} - (R_T + R_{пр} + R_{\phi}) I_n = U_{н.ср.}^{XX} - R_{вых} I_n,$$

где $U_{н.ср.}^{XX}$ - выходное напряжение выпрямителя в режиме холостого хода;

R_T – сопротивление вторичной обмотки трансформатора;

$R_{пр}$ – суммарное сопротивление открытых вентилях;

R_{ϕ} – суммарное сопротивление фильтра.

Предварительное задание к эксперименту

1. Для заданного в табл.3.3 выпрямителя и указанных там же значений напряжения U_n , мощности P_n нагрузки рассчитать прямой ток вентилях $I_{пр}$, обратное напряжение $U_{вmax}$ и по справочнику выбрать диоды. Определить для трансформатора напряжение вторичной обмотки U_2 , коэффициент трансформации k_T , расчетную мощность S_T , если напряжение питающей сети $U_1=220В$, частота $f_1=50$ Гц. Рассчитать параметры сглаживающего фильтра для обеспечения коэффициента пульсаций напряжения нагрузки q_n согласно данным табл.3.3. Для составных фильтров принять $C_{\phi} = 20$ мкФ. Результаты расчетов записать в табл.3.4.

2. Рассчитать и построить внешнюю характеристику для заданного в табл.3.3 выпрямителя, приняв его $R_{вых}=10 \dots 15$ Ом в диапазоне изменения нагрузочного тока от 0 до 500 мА.

Примечание: объем предварительного задания может быть уменьшен по указанию преподавателя.

ТАБЛИЦА 3.3

| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----------------|---------|-----------|-----------|---------|---------|-----------|---------|-----------|
| Тип выпрямителя | Рис.3.2 | Рис.3.3 | Рис.3.2 | Рис.3.3 | Рис.3.2 | Рис.3.3 | Рис.3.2 | Рис.3.3 |
| U_n , В | 7 | 13 | 8 | 14 | 8,5 | 15 | 9 | 16 |
| P_n , Вт | 1,2 | 4 | 0,4 | 4 | 0,05 | 3 | 0,01 | 1,6 |
| Тип фильтра | L | Г-обр. LC | П-обр. LC | L | C | Г-обр. LC | C | П-обр. LC |
| q_n | 0,02 | | 0,01 | | 0,01 | | 0,02 | |

ТАБЛИЦА 3.4

| Параметры | I_n , мА | $I_{пр}$, мА | $U_{вmax}$, В | U_2 , В | k_T | S_T , Вт | S | C_{ϕ} , мкФ | L_{ϕ} , Гн |
|-----------|------------|---------------|----------------|-----------|-------|------------|-----|------------------|-----------------|
| Вычислено | | | | | | | | | |

Порядок выполнения эксперимента

1. Ознакомиться с устройством стенда для исследования однофазных выпрямителей.

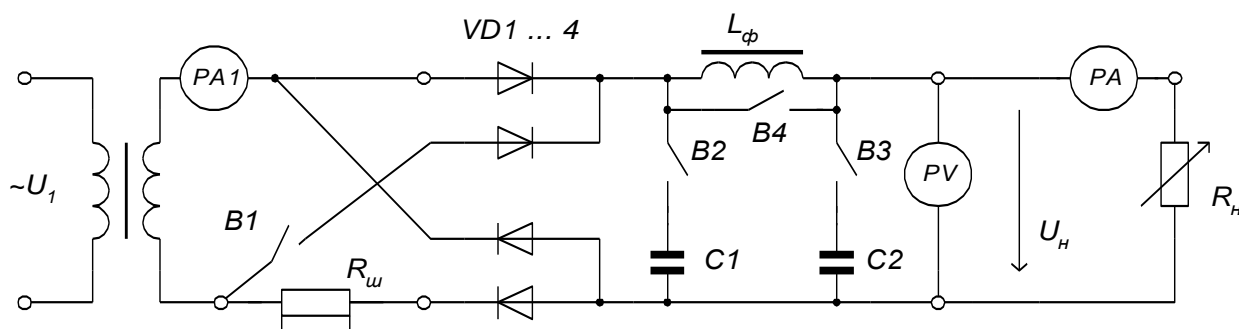


Рисунок 3.5 Схема установки

2. Подключить согласно рис.3.5 к выходным клеммам выпрямительного устройства нагрузку R_n , вольтметр PV , амперметр PA и осциллограф. Подать питание на стенд и измерительные приборы.

3. В режиме холостого хода для однополупериодного ($B1$ отключен) и для мостового ($B1$ включен) выпрямителей установить регулятором напряжения $U1$ максимальное выходное напряжение, измерить его значения и определить кратность напряжений $U_2 / U_{н.ср.}$ в режиме работы без фильтра ($B2$ и $B3$ отключены, $B4$ включен).

4. Изменяя сопротивлением R_n ток нагрузки выпрямителя I_n от 0 до максимального значения, снять внешние характеристики одополупериодного и мостового выпрямителей при работе без фильтра; с емкостным; индуктивным; Г-образным; П-образным фильтрами. Результаты измерений записать в табл.3.5. Обратить внимание на изменение напряжения на нагрузке и увеличение потребления переменного тока при включении конденсаторов фильтра.

ТАБЛИЦА 3.5

| Тип выпрямителя | | | | | | | | | |
|-----------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|-------------|-------|--------------|-------|
| без фильтра | | с С-фильтром | | с L-фильтром | | с Г-обр. LC | | с П-обр. CLC | |
| I_n | U_n | I_n | U_n | I_n | U_n | I_n | U_n | I_n | U_n |
| 0 | | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | |

5. Зарисовать с экрана осциллографа кривые выпрямленного напряжения на нагрузке для всех режимов работы выпрямителей согласно п.4. Для режимов работы с фильтром график напряжения зарисовать для режима холостого хода

и максимальной нагрузки. На рисунках показать масштабную сетку, ось времени и значения масштабов по напряжению и времени.

6. Подключить осциллограф на шунт $R_{ш}$, получить на экране осциллографа и зарисовать временную диаграмму тока вентиля $i_B(t)$ при максимальном токе нагрузки и отключенном фильтре.

7. По результатам измерений (табл.3.5) построить в единой системе координат внешние характеристики выпрямителей при работе с разными типами фильтров. Сопоставить внешнюю характеристику, рассчитанную в предварительном задании с экспериментальными. Рассчитать по экспериментальным характеристикам $R_{вых}$ выпрямителей при работе без фильтра, сравнить расчетные значения с диапазоном значений в предварительном задании.

Содержание отчета

Цель работы; схема лабораторной установки (рис.3.5), расчет предварительного задания, внешние характеристики выпрямителей без фильтра и с фильтрами в общей системе координат, осциллограммы временных диаграмм напряжений и токов.

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действие выпрямителей. 2. Как влияет емкостный фильтр на величину обратного напряжения на вентиле? 3. Почему уменьшаются пульсации выпрямленного напряжения при включении емкостного или индуктивного фильтра? 4. Достоинства и недостатки разных типов фильтров. 5. Что такое коэффициент пульсаций и коэффициент сглаживания? 6. По каким критериям осуществляется выбор вентиля? 7. Как определяется мощность трансформатора в выпрямителях? 8. Как изменится форма напряжения на нагрузке при пробое одного вентиля в исследуемых выпрямителях?

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛИЗАТОРОВ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА

Цель работы: изучение устройства, принципа действия и исследование характеристик компенсационного стабилизатора напряжения и стабилизатора тока.

Общие сведения

С т а б и л и з а т о р о м называют устройство, автоматически поддерживающее с заданной точностью напряжение или ток в нагрузке при изменении питающего напряжения или сопротивления нагрузки в заданных пределах.

Основным параметром стабилизатора напряжения является коэффициент стабилизации напряжения, а стабилизатора тока - коэффициент стабилизации тока

$$K_{ст\ U} = \frac{\Delta U_{вх}}{U_{вх}} \bigg/ \frac{\Delta U_{вых}}{U_{вых}}; \quad K_{ст\ I} = \frac{\Delta U_{вх}}{U_{вх}} \bigg/ \frac{\Delta I_{вых}}{I_{вых}}$$

при $R_H = const$,

где $U_{вх}$, $U_{вых}$, $I_{вых}$ - номинальные напряжения на входе и выходе стабилизатора и номинальный ток нагрузки;

$\Delta U_{вх}$, $\Delta U_{вых}$, $\Delta I_{вых}$ - изменения напряжений на входе и выходе стабилизатора и изменение тока нагрузки.

Влияние нагрузки R_H оценивается по внешним характеристикам $U_{вых}(I_{вых})$ и $I_{вых}(R_H)$ или выходным (внутренним) сопротивлением стабилизатора

$$R_{вых} = \frac{\Delta U_{вых}}{\Delta I_{вых}} \text{ при } U_{вх} = const.$$

Для стабилизатора напряжения $R_{вых} \ll R_H$, а для стабилизатора тока - $R_{вых} \gg R_H$.

Применяют два типа стабилизаторов: параметрические и компенсационные.

В параметрических стабилизаторах используются элементы с нелинейной вольтамперной характеристикой (ВАХ), обеспечивающие постоянство напряжения при значительных изменениях тока для стабилизаторов напряжения и постоянство тока при изменении напряжения в стабилизаторах тока. Такими элементами могут быть стабилитроны или транзисторы.

Компенсационные стабилизаторы напряжения имеют большие коэффициенты стабилизации и меньшее $R_{вых}$ при более высоком КПД. Структурная схема такого стабилизатора

приведена на рис. 4.1. Стабилизатор состоит из источника эталонного напряжения 1, измерительного элемента 2 и регулирующего элемента 3.

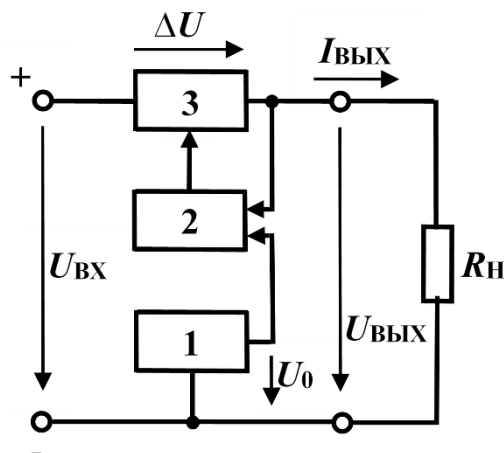


Рисунок 4.1 Структурная схема стабилизатора

На входы измерительного элемента подаются эталонное напряжение U_0 и $U_{\text{ВЫХ}}$. Если $U_{\text{ВЫХ}}$ не равно U_0 появляется сигнал рассогласования, который поступает на вход регулирующего элемента. Под действием этого сигнала падение напряжения на регулирующем элементе меняется таким образом, чтобы $U_{\text{ВЫХ}}$ оставалось постоянным

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} - \Delta U = \text{const.}$$

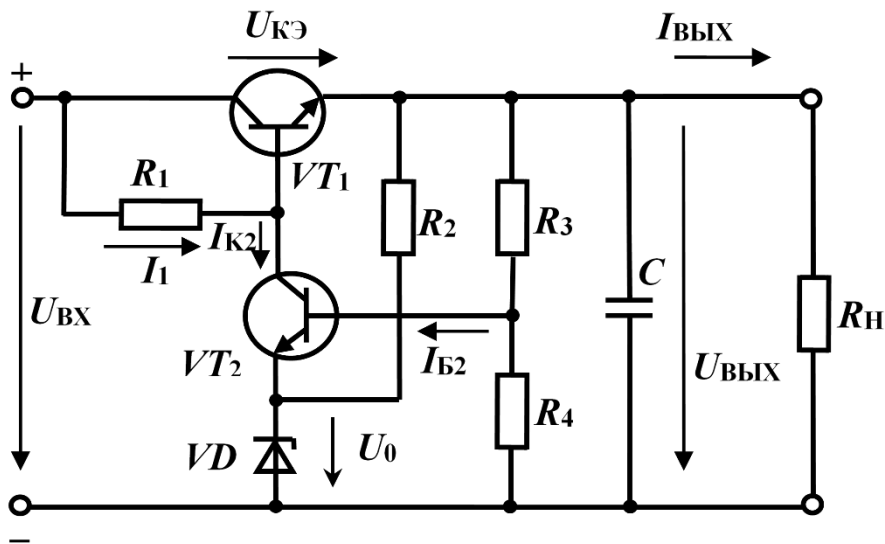


Рисунок 4.2 Компенсационный стабилизатор напряжения

В качестве источника эталонного напряжения чаще всего используется стабилитрон, а роль регулирующего элемента выполняет транзистор или составной транзистор. В большинстве современных стабилизаторов измерительный элемент выполняется на операционном усилителе

В работе предлагается исследовать компенсационный стабилизатор на транзисторе, схема которого показана на рис. 4.2. В этой схеме в качестве

регулирующего элемента использован транзистор VT_1 , измерительный элемент реализован на транзисторе VT_2 . Ток этого транзистора зависит от разности напряжений между базой и эмиттером. В качестве эталонного источника напряжения применен параметрический стабилизатор на резисторе R_2 и стабилитроне VD . Выходное напряжение поступает на базу транзистора VT_2 через делитель напряжения R_3, R_4 .

Если напряжение на выходе стабилизатора по каким-либо причинам возросло, то возрастает напряжение $U_{БЭ}$ транзистора VT_2 , что приводит к росту токов $I_{Б2}, I_{К2}$. К коллектору VT_2 подключена база транзистора VT_1 , следовательно, изменение $I_{К2}$ вызывает противоположное изменение $I_{Б1}$, т.к. $I_1 = const$. Снижение тока $I_{Б1}$ приведет к увеличению выходного сопротивления транзистора VT_2 , падение напряжение на транзисторе $U_{КЭ1}$ возрастет, таким образом $U_{ВЫХ} = U_{ВХ} - U_{КЭ1}$ остается практически неизменным. Основные параметры стабилизатора определяют:

$$K_{cm\ U} = \frac{U_{ВЫХ} \cdot R_1 \cdot R_4}{U_{ВХ} \cdot (R_3 + R_4)} h_{21} / (h_{11} + R_1);$$

$$R_{ВЫХ} = \frac{h_{11} \cdot R_4}{h_{21} \cdot (R_3 + R_4)}.$$

Схема исследуемого стабилизатора тока показана на рис. 4.3. На базе транзистора VT поддерживается постоянный потенциал, задаваемый параметрическим стабилизатором на стабилитроне VD . Нагрузка R_H включена в коллекторную цепь транзистора VT , который включен по схеме с общей базой, где $I_K = \alpha I_{Э}$.

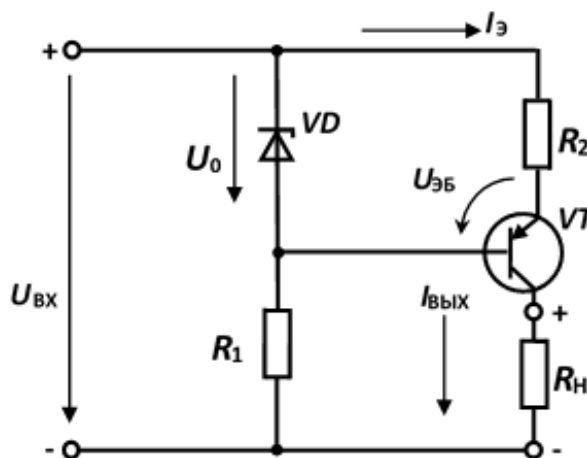


Рисунок 4.3 Компенсационный стабилизатор тока

Ток эмиттера $I_{Э}$ определяется напряжением $U_{ЭБ} = U_0 - R_2 I_{Э}$.

Благодаря этому устанавливается режим работы

$$I_{Э} = (U_0 - U_{ЭБ}) / R_2 = const.$$

У современных транзисторов $\alpha \rightarrow 1$, таким образом, получается устройство, выходной ток которого $I_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{К}} \approx I_{\text{Э}}$, не зависит от $R_{\text{Н}}$, а определяется только U_0 и R_2 . Режим стабилизации поддерживается до тех пор, пока транзистор VT работает в активном режиме, т.е.

$$U_{\text{ВХ}} > \Delta U + I_{\text{ВЫХ}} R_{\text{Н}},$$

где ΔU - напряжение насыщения транзистора.

Отсюда максимальное значение сопротивления нагрузки, при котором сохраняется рабочий режим стабилизатора

$$R_{\text{Н max}} = \frac{U_{\text{ВХ}} - \Delta U}{I_{\text{ВЫХ}}}.$$

Коэффициент стабилизации тока

$$K_{\text{см}} = I_{\text{ВЫХ}} / (U_{\text{ВХ}} h_{22}).$$

Выходное сопротивление стабилизатора

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{h_{21} \cdot R_2}{h_{22}(r_{\text{д}} + h_{11})}.$$

Предварительное задание к эксперименту

1. Для компенсационного стабилизатора напряжения (рис. 4.2) рассчитать $K_{\text{ст}}$ и $R_{\text{ВЫХ}}$, если $R_1 = 6,8$ кОм; $R_3 = 1,2$ кОм; $R_4 = 6,8$ кОм; для транзистора VT2: $h_{11} = 1,2$ кОм; $h_{21} = 180$. Входное и выходное напряжения принять $U_{\text{ВХ}} = 22$ В; $U_{\text{ВЫХ}} = 12$ В.

2. Используя метод эквивалентного генератора при $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{XX}} = 12$ В и рассчитанном в п.1 значении $R_{\text{ВЫХ}}$, определить изменение выходного напряжения $\Delta U = I_{\text{Н}} R_{\text{ВЫХ}}$ и выходное напряжение стабилизатора $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ}}^{\text{XX}} - \Delta U$ при заданном в табл.4.1 токе нагрузки $I_{\text{Н}}$.

3. Рассчитать $R_{\text{ВЫХ}}$ стабилизатора тока (рис. 4.3), если $R_2 = 180$ Ом, дифференциальное сопротивление стабилитрона $r_{\text{д}} = 35$ Ом. Транзистор VT имеет следующие параметры: $h_{11} = 50$ Ом; $h_{22} = 1$ мСм; $h_{21} = 30$.

4. Определить для стабилизатора тока максимально допустимое сопротивление нагрузки $R_{\text{Н max}}$ при $U_{\text{ВХ}}$ и $I_{\text{ВЫХ}}$, заданных в табл. 4.1. Принять $\Delta U = 1$ В.

ТАБЛИЦА 4.1

| Варианты | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----------------------------|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| $I_{\text{н}}, \text{мА}$ | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| $U_{\text{вх}}, \text{В}$ | 23 | | 24 | | 25 | | 26 | |
| $I_{\text{вых}}, \text{мА}$ | 20 | | | | 40 | | | |

Порядок выполнения эксперимента

1. Входное напряжение $U_{\text{вх}}$ на стабилизаторы подается от выпрямителя, который исследовался в лабораторной работе 3. $U_{\text{вх}}$ измеряется вольтметром $V1$.
2. Подготовить схему однофазного мостового выпрямителя с П-образным фильтром, поставив в нужное положение выключатели В1-В4.
3. Подключить нагрузку $R_{\text{н}}$ к выходным клеммам стабилизатора напряжения и цифровые приборы для измерения тока нагрузки $I_{\text{н}}$ и выходного напряжения $U_{\text{вых}}$.
4. Включить выключатель стабилизатора напряжения и выключатель выпрямителя (выключатель стабилизатора тока должен быть выключен). При минимальном токе нагрузки снять зависимость $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$, изменяя $U_{\text{вх}}$ от 0 до максимального значения с помощью регулятора напряжения U_1 . Построить график зависимости и определить по ней $K_{\text{ст}}$. Сравнить с расчетным по п.1 предварительного задания $K_{\text{ст}}$.

ТАБЛИЦА 4.2

| | | | | | | |
|--------------------|---|--|--|--|--|--|
| $U_{\text{вх}}$ В | 0 | | | | | |
| $U_{\text{вых}}$ В | | | | | | |

5. Установить максимальное входное напряжение $U_{\text{вх}}$. Изменяя сопротивление нагрузки во всем диапазоне, снять зависимость $U_{\text{вых}}(I_{\text{н}})$. Построить выходную характеристику стабилизатора и определить по ней $R_{\text{вых}}$. Сравнить с результатами расчетов по п.2 предварительного задания.

ТАБЛИЦА 4.3

| | | | | | | |
|--------------------|--|--|--|--|--|--|
| $I_{\text{н}}$ мА | | | | | | |
| $U_{\text{вых}}$ В | | | | | | |

6. Отключить выключатели выпрямителя и стабилизатора напряжения. Подключить нагрузку к выходу стабилизатора тока.
7. Включить выключатель стабилизатора тока и выключатель выпрямителя. Установить с помощью регулятора U_1 максимальное входное напряжение. Изменяя $R_{\text{н}}$ во всем диапазоне, снять зависимость $I_{\text{вых}}(U_{\text{вых}})$. По полученным результатам рассчитать для каждого измерения $R_{\text{н}}$ и построить $I_{\text{вых}}(R_{\text{н}})$. Определить $R_{\text{н max}}$ и $R_{\text{вых}}$ стабилизатора. Сравнить с результатами расчетов предварительного задания.

ТАБЛИЦА 4.2

| | | | | | | |
|---------------------|--|--|--|--|--|--|
| $I_{\text{вых}}$ мА | | | | | | |
| $U_{\text{вых}}$ В | | | | | | |
| $R_{\text{вых}}$ Ом | | | | | | |

8. Установить минимальное сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$ (минимальное $U_{\text{вых}}$). Изменяя $U_{\text{вх}}$ от 0 до максимального значения, снять зависимость

$I_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$. Построить график $I_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$ и определить $K_{\text{ст}}$. Сравнить с результатами расчетов предварительного задания.

ТАБЛИЦА 4.4

| | | | | | | |
|---------------------|--|--|--|--|--|--|
| $U_{\text{вх}}$ В | | | | | | |
| $I_{\text{вых}}$ мА | | | | | | |

С о д е р ж а н и е о т ч е т а

Цель работы; полные схемы компенсационного стабилизатора напряжения и стабилизатора тока с обозначением всех элементов, указанием токов, напряжений; результаты расчета предварительного задания; результаты эксперимента в виде таблиц и графиков; результаты расчетов $K_{\text{ст}}$, $R_{\text{вых}}$ по графикам; сравнительный анализ результатов.

К о н т р о л ь н ы е в о п р о с ы

1. Каково назначение электронных стабилизаторов? 2. Как устроен и как работает параметрический стабилизатор напряжения и тока? 3. Поясните назначение элементов схемы компенсационного стабилизатора напряжения? 4. От каких элементов зависит коэффициент стабилизации? 5. Как можно осуществить регулирование $U_{\text{вых}}$ стабилизатора напряжения? 6. Поясните принцип действия стабилизатора тока. 7. Как можно изменить выходной ток стабилизатора? 8. Почему стабилизатор тока может работать только на нагрузку с R меньше $R_{\text{нmax}}$? 9. Почему стабилизатор тока и стабилизатор напряжения имеют разные выходные сопротивления?

Лабораторная работа №5

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

Ц е л ь р а б о т ы : изучение основных характеристик операционного усилителя (ОУ); исследование типовых аналоговых и импульсных устройств на базе ОУ.

Общие сведения

Операционные усилители (ОУ) являются разновидностью усилителей постоянного тока, имеют большой коэффициент усиления по напряжению $k_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = 5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^6$ и высокое входное сопротивление $R_{\text{вх}} = 20 \text{ кОм} - 10 \text{ МОм}$.

Современные ОУ выполняются многокаскадными и включают в себя ряд дополнительных устройств (защиту, термокомпенсацию и др.) Массовое применение ОУ обусловлено их универсальностью: устройства на их базе могут осуществлять усиление, выполнять математические операции, сравнивать электрические величины, генерировать сигналы различной формы.

В данной работе использована микросхема К544УД1А, которая представляет собой операционный усилитель общего назначения с высоким входным сопротивлением. На рис.5.1 приведены условные обозначения и типовая схема включения ОУ. Он имеет два входа и один выход. При подаче сигнала на инвертирующий вход $U_{\text{вх.и.}}$ приращение выходного сигнала $U_{\text{вых}}$ находится в противофазе (противоположное по знаку) с приращением $U_{\text{вх}}$, а при подаче на неинвертирующий вход - совпадают по фазе (одинаковы по знаку). В зависимости от конкретного устройства на базе ОУ используют как инвертирующий, так и неинвертирующий входы.

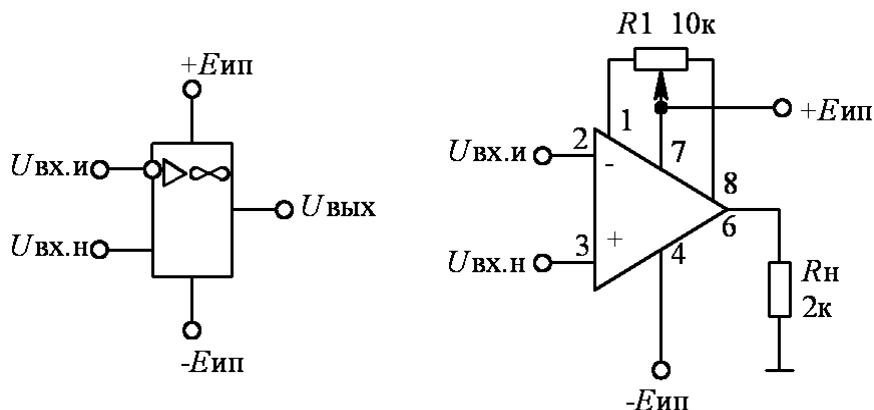


Рисунок 5.1 Обозначение операционного усилителя

На рис.5.2 приведена принципиальная схема ОУ К544УД1А. Высокое входное сопротивление ОУ обеспечивается согласованной парой полевых транзисторов VT1, VT5 входного дифференциального каскада, включающего

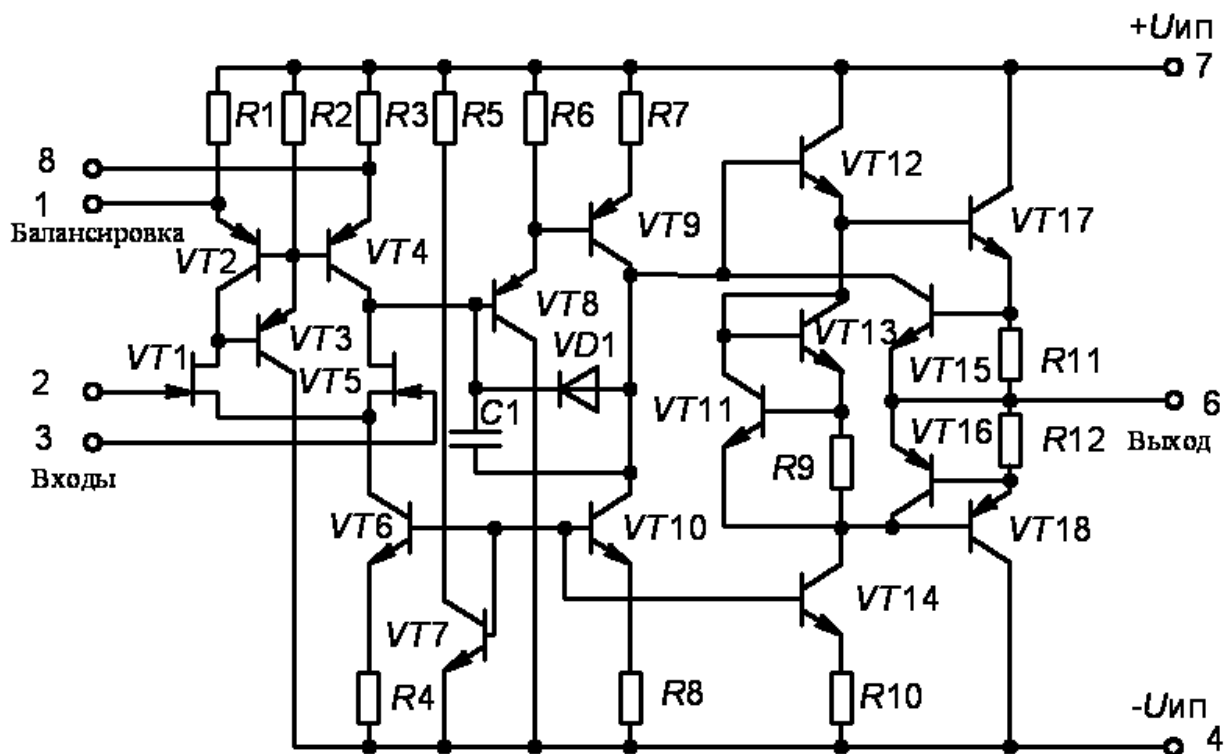


Рисунок 5.2 Принципиальная схема ОУ

в себя кроме названных транзисторы $VT2$, $VT4$ и резисторы $R1$, $R3$. Работа этого каскада обеспечивается стабилизатором тока, включающим транзисторы $VT6$, $VT7$ и резисторы $R4$, $R5$. Температурная компенсация осуществляется звеном, выполненным на транзисторах $VT10$, $VT14$ и резисторах $R8$, $R10$. ОУ имеет защиту от коротких замыканий по выходу ($VT16$, $VT18$, $R12$). Выходным каскадом является составной эмиттерный повторитель ($VT12$, $VT17$, $VT15$, $R11$), имеющий низкое выходное сопротивление и обеспечивающий нагрузочную способность. Выходной каскад имеет свой стабилизатор тока ($VT11$, $VT13$, $R9$). В согласующее звено между входными и выходными цепями входят элементы: $R6$, $R7$, $VT8$, $VT9$, $VD1$, $C1$.

Важнейшими характеристиками

ОУ являются амплитудные

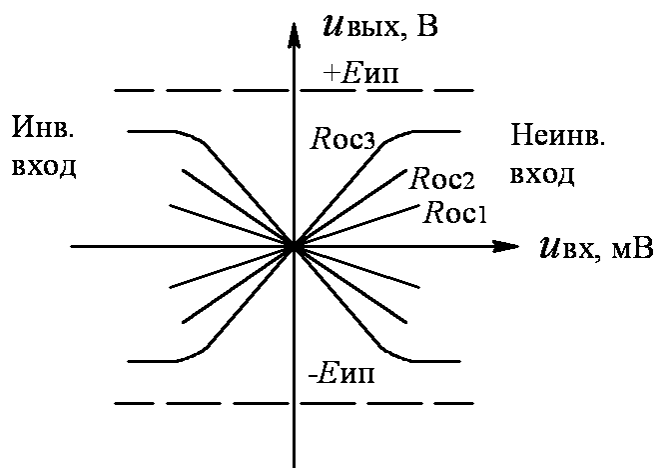


Рисунок 5.3

Амплитудная характеристика

(передаточные) $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$

(рис.5.3) и амплитудно-

частотные (АЧХ) $k_u(f)$.

Последние имеют вид АЧХ

усилителя постоянного тока за

исключением специальных

частотнозависимых устройств

(избирательный усилитель и

др.). Передаточные

характеристики имеют

линейный участок, для

которого $k_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \text{const}$, и

нелинейный - $k_{и.н} < k_{и.л}$. При реализации конкретных устройств используют линейные и нелинейные участки. Рассмотрим примеры построения устройств на базе ОУ.

Аналоговые схемы, работающие на линейных участках амплитудных характеристик

И н в е р т и р у ю щ и й у с и л и т е л ь (рис. 5.4) изменяет знак выходного сигнала относительно входного. На инвертирующий вход через резистор R_1 подается $U_{вх}$ и вводится параллельная отрицательная обратная связь по напряжению с помощью резистора $R_{о.с.}$. Коэффициент усиления

$$k_{и.и} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = -\frac{R_{о.с.}}{R_1}.$$

Для уменьшения погрешностей от изменения входных токов делают симметричные входы, выбирая $R_2 = R_1 \parallel R_{о.с.}$.

Н е и н в е р т и р у ю щ и й у с и л и т е л ь (рис. 5.5) не изменяет знак выходного сигнала относительно входного и

$$k_{и.н} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = 1 + \frac{R_{о.с.}}{R_1}.$$

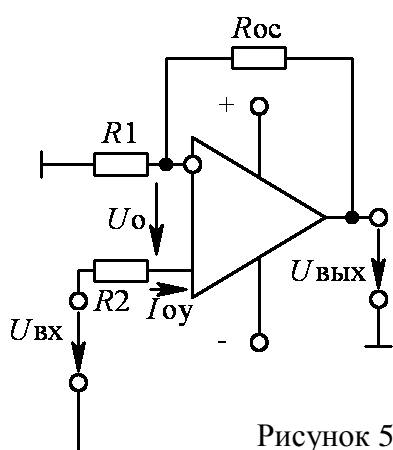


Рисунок 5.5
Неинвертирующий
усилитель

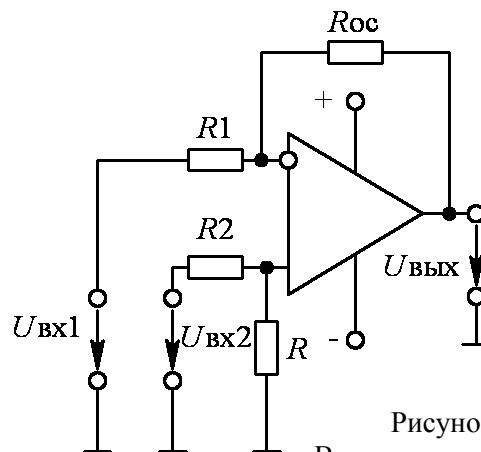


Рисунок 5.6
Вычитатель - усилитель

В ы ч и т а т е л ь - у с и л и т е л ь (рис. 5.6) предназначен для усиления разностных сигналов. Если $R_1 = R_2$ и $R_{о.с.} = R$, то $U_{вых} = (U_{вх2} - U_{вх1})$.

С у м м а т о р ы. Схемы инвертирующего и неинвертирующего сумматоров приведены на рис.5.7, 5.8. Для инвертирующего сумматора выходное напряжение определяется по формуле

$$U_{вых} = -\left(\frac{R_{о.с.}}{R_1}U_{вх1} + \frac{R_{о.с.}}{R_2}U_{вх2} + \dots + \frac{R_{о.с.}}{R_n}U_{вхn}\right).$$

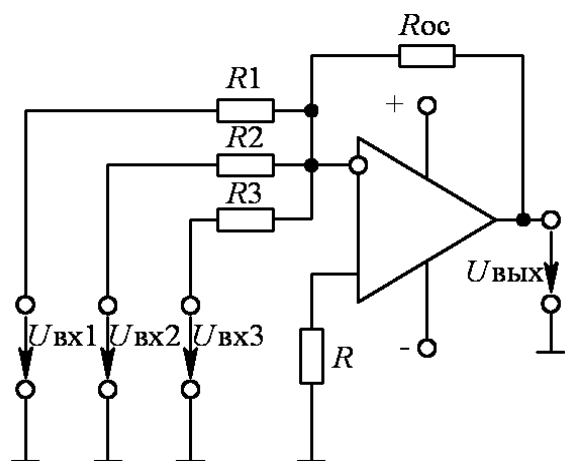


Рисунок 5.7
Инвертирующий
сумматор

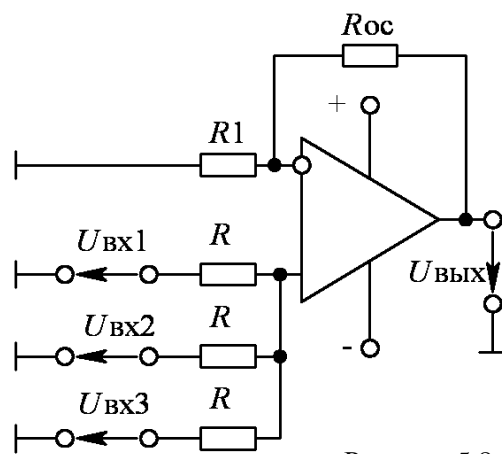


Рисунок 5.8
Неинвертирующий
сумматор

При равенстве входных сопротивлений $R_1 = R_2 = R$

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{R_{\text{o.c.}}}{R} (U_{\text{BX.1}} + U_{\text{BX.2}} + \dots + U_{\text{BX.n}}) - \text{для инвертирующего сумматора};$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{1 + R_{\text{o.c.}}/R}{n} (U_{\text{BX1}} + U_{\text{BX2}} + \dots + U_{\text{BXn}}) - \text{для неинвертирующего сумматора}.$$

В схеме сумматоров переменным параметром является сопротивление обратной связи $R_{\text{o.c.}}$, которое и определяет коэффициент усиления. Формулы приведены для постоянных величин (числовой сумматор) $U_{\text{BX.1}}$, $U_{\text{BX.2}}$ и т.д. В работе исследуется также инвертирующий геометрический сумматор, для которого складываются мгновенные значения $U_{\text{BX.1}}$ и $U_{\text{BX.2}}$.

И н т е г р а т о р , схема которого показана на рис.5.9, реализует операцию

$$u_{\text{ВЫХ}} = -\frac{1}{R_1 C_{\text{o.c.}}} \int_0^t u_{\text{ВХ}} \cdot dt = -\frac{1}{\tau} \int_0^t u_{\text{ВХ}} \cdot dt$$

где $\tau = R_1 C_{\text{o.c.}}$ - постоянная времени.

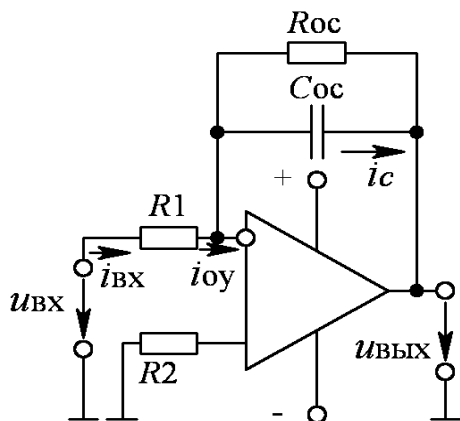


Рисунок 5.9
Интегратор

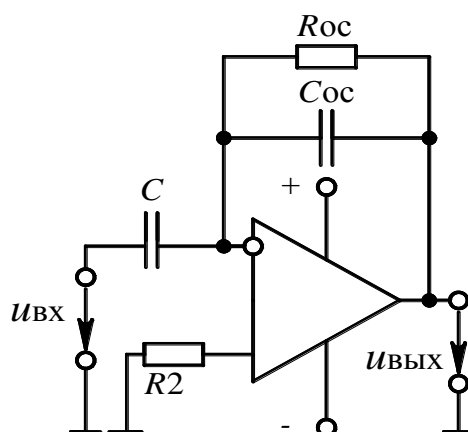


Рисунок 5.10
Дифференциатор

Д и ф ф е р е н ц и а т о р (рис. 5.10) выполняет операцию

$$u_{\text{ВЫХ}} = -R_{o.c}C \frac{du_{\text{ВХ}}}{dt} = -\tau \frac{du_{\text{ВХ}}}{dt}.$$

Для интегратора и дифференциатора на инвертирующий вход подаются прямоугольные импульсы с выхода симметричного мультивибратора. На рис.5.11, а приведен электрический аналог и на рис.5.11,б временные диаграммы, поясняющие принцип дифференцирования и интегрирования в электрических и электронных цепях.

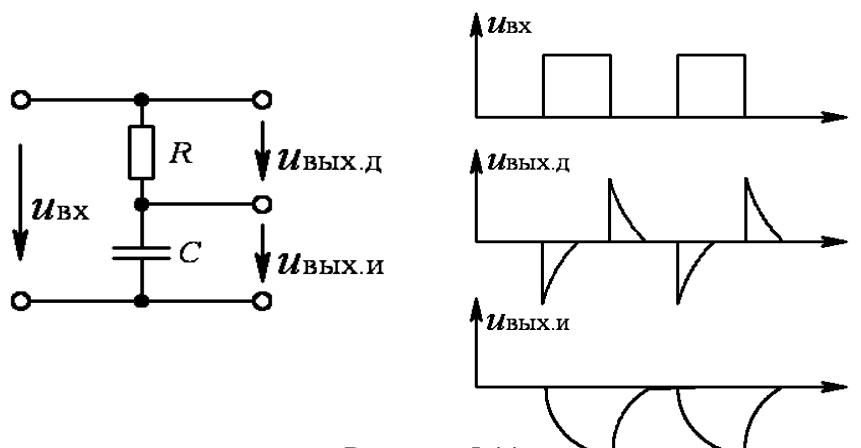


Рисунок 5.11

Л и н е й н ы е у с и л и т е л и представлены инвертирующим усилителем (рис.5.12), для которого $U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{R_{o.c}}{R_1} \cdot U_{\text{ВХ}}$ и избирательным усилителем (рис.5.13) с частотно-зависимым двойным Т-образным мостом на базе

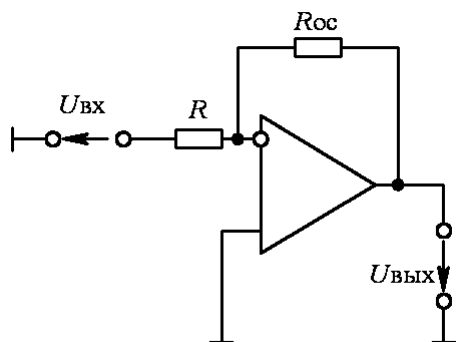


Рисунок 5.12
Линейный усилитель

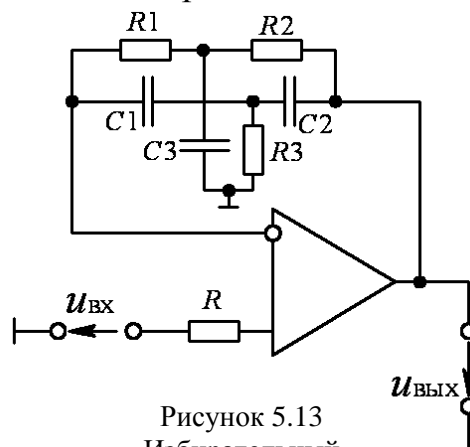


Рисунок 5.13
Избирательный усилитель

резисторов R_1 , R_2 , R_3 и конденсаторов C_1 , C_2 , C_3 , подключенным по схеме отрицательной обратной связи, для которого $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$. Мост выполняется

симметричным, т.е. $R_1=R_2=R$, $C_1=C_2=C$ и $R_3=\frac{R_1R_2}{R_1+R_2}=0,5R$. Если $C_3=C_1+C_2=2C$, тогда $\omega_0=\frac{1}{R_1C_1}=\frac{1}{R_2C_2}=\frac{1}{R_3C_3}=\frac{1}{RC}$.

Генераторы

Мультивибратором называется генератор периодически повторяющихся импульсов прямоугольной формы. Мультивибратор (рис.5.14) является автогенератором и работает без подачи входного сигнала. Рассматриваемый генератор является симметричным и для него длительность импульса и паузы равны $t_{и}=t_{п}=R_{о.с}C\cdot\ln(1+)$, при $R_1=R_2$ $t_{и}=t_{п}=R_{о.с}C\cdot\ln 3$, период

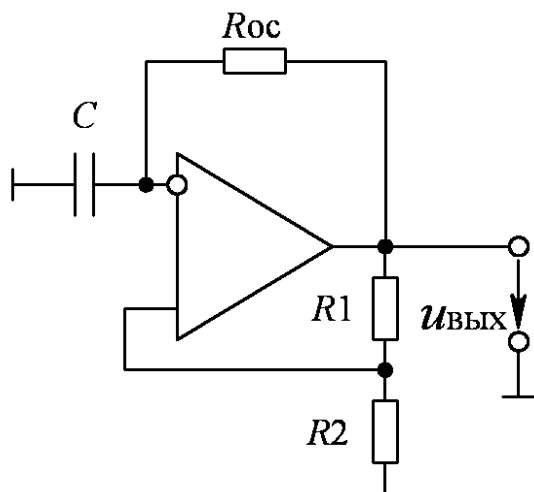


Рисунок 5.14
Мультивибратор

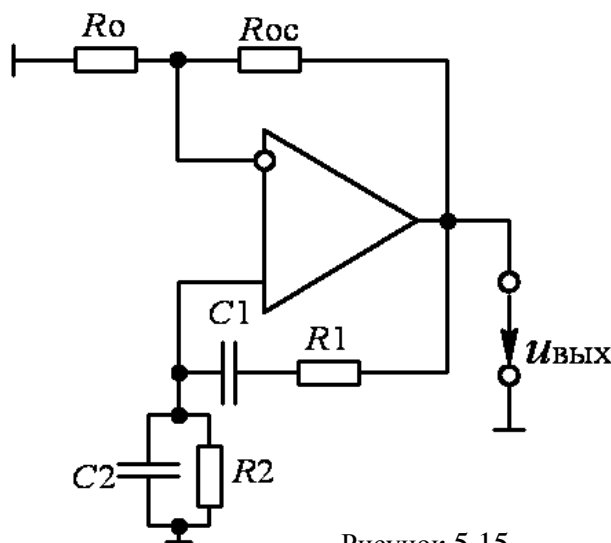


Рисунок 5.15
Генератор
мостом Вина

повторения импульсов $T_{п}=(t_{и}+t_{п})=2t_{и}$, скважность $Q=\frac{T_{п}}{t_{и}}=2$. Изменяя $\tau=R_{о.с}C$ и величины R_1 , R_2 , можно регулировать длительность, частоту и амплитуду импульсов.

Генератор гармонических колебаний мостом Вина на базе ОУ (рис. 5.15) является самовозбуждающимся устройством. Мост Вина, состоящий из элементов R_1 , R_2 , C_1 , C_2 , образует звено частотно-зависимой положительной обратной связи, для которого

$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}$ - частота генерации частотно-зависимой цепи. При $R_1=R_2=R$ и

$C_1=C_2=C$ (условие обязательное) $f_0=\frac{1}{2\pi RC}$. Соотношение параметров $R_{о.с}$ и R_0 определяет коэффициент усиления k_u .

Генератор линейно-изменяющегося напряжения (ГЛИН) предназначен для получения напряжения, которое в течение некоторого времени нарастает или спадает по линейному или близкому к линейному закону и используется в каскадах сравнения, схемах временной задержки импульсов, для получения временных разверток в

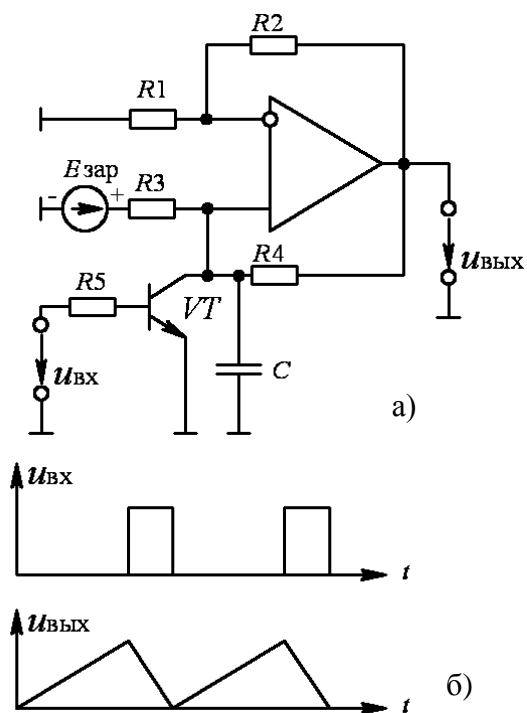


Рисунок 5.16
Генератор ГЛИН

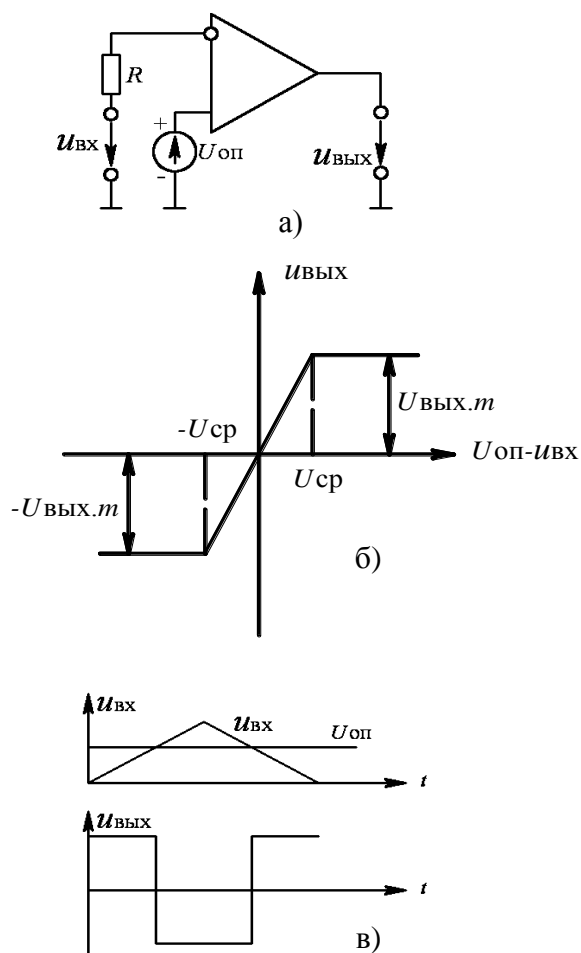


Рисунок 5.17
Компаратор

электронно-лучевых трубках и т.д. Реализация ГЛИНа на ОУ и временные диаграммы входного и выходного напряжений даны на рис.5.16. Принцип работы основан на применении зарядного или разрядного устройства, интегрирующего конденсатора C и электронного ключа на транзисторе VT . При закрытом состоянии ключа происходит заряд конденсатора C от $E_{зар}$ через R_3 с постоянной времени $\tau_{зар} = R_3 C$, что определяет длительность прямого (рабочего) хода. Замыкание ключа приводит к быстрой разрядке конденсатора и время обратного хода определяется сопротивлением насыщенного транзистора. Выходное напряжение повторяет форму напряжения на конденсаторе C и имеет вид “пилы”.

Пороговые устройства предназначены для сравнения двух входных величин. В рассматриваемых схемах сравниваются постоянное $U_{оп}$ и переменное $u_{вх}$ напряжения. На рис.5.17, а приведен **двухвходовый компаратор**, у которого сравнивающиеся сигналы поступают на оба входа усилителя. Поэтому состояние выхода компаратора (полярность выходного напряжения) определяется большим по уровню напряжением одного из входов, что отражает идеализированная (без учета гистерезиса) передаточная характеристика (рис.5.17, б). При равенстве входных напряжений выходное напряжение равно нулю. При $\Delta U_{вх} = U_{оп} - U_{вх} > 0$ напряжение на выходе ОУ будет равно $u_{вых} = U_{вых.м}$, если же $\Delta U_{вх} = U_{оп} - U_{вх} < 0$, то $u_{вых} = -U_{вых.м}$.

Уровень входного напряжения компаратора ограничивается

допустимым синфазным входным напряжением. Принцип работы устройства поясняется временными диаграммами для $u_{\text{ВХ}}$ и $u_{\text{ВЫХ}}$ (рис.5.17, в). Обратные связи для этого компаратора не предусмотрены ни по одному из входов.

Для ускорения процесса переключения используют ускоряющие цепи на основе введения положительных обратных связей (ПОС). Такой компаратор с ПОС называется также триггером Шмитта (рис.5.18, а). Здесь применяется ПОС через цепочку R_1, R_2 , а входной сигнал подается на инвертирующий вход.

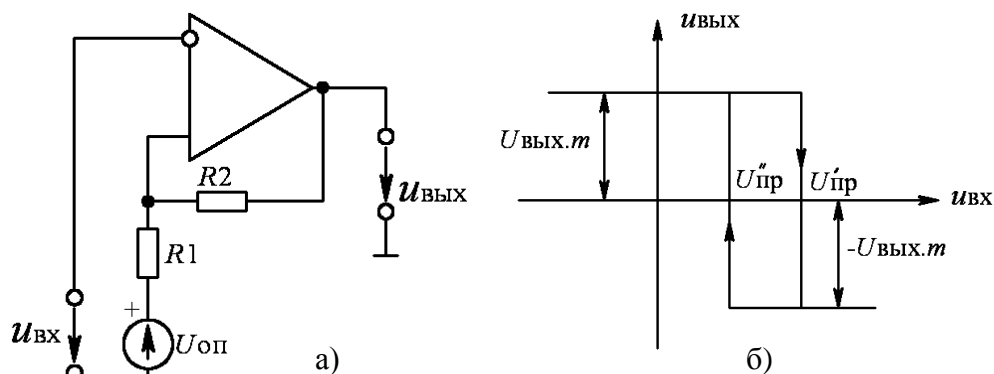


Рисунок 5.18
Триггер Шмитта

На рис.5.18,б построена передаточная характеристика этого компаратора, для которой

$$U_{\text{пр}}' = U_{\text{оп}} \frac{R_2}{R_1 + R_2} + U_{\text{вых.м}} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_{\text{пр}}'' = U_{\text{оп}} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - U_{\text{вых.м}} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_{\Gamma} = U_{\text{пр}}' - U_{\text{пр}}'' = 2U_{\text{вых.м}} \frac{R_1}{R_1 + R_2},$$

U_{Γ} - ширина петли, определяющая соотношением сопротивлений делителя R_1 и R_2 .

Предварительное задание к эксперименту

1. Для инвертирующего усилителя (рис.5.4) $R_1=10$ кОм и $R_{\text{о.с}}=20, 100$ и 270 кОм рассчитать и построить амплитудную характеристику при изменении $U_{\text{ВХ}}$ от 0 до 1000 мВ и ограничении $U_{\text{ВЫХ}}=12$ В.

2. Рассчитать $U_{\text{ВЫХ}}$ вычитателя-усилителя (рис.5.6) при $R_1=R_2=R=10$ кОм и $R_{\text{о.с}}=10$ и 20 кОм при трех значениях $U_{\text{ВХ1}}$ и $U_{\text{ВХ2}}$ в пределах ± 1000 мВ. Результат внести в табл.5.2.

3. Рассчитать $U_{\text{ВЫХ}}$ инвертирующего сумматора (рис.5.7) при $R_1=R_2=R=10$ кОм и $R_{\text{о.с}}=20, 50, 100$ кОм при трех различных наборах $U_{\text{ВХ1}}$ и $U_{\text{ВХ2}}$ в пределах ± 1000 мВ. Результат внести в табл.5.2.

4. Определить постоянную времени τ для интегратора $R_1=10$ кОм; $C_{\text{о.с}}=5$ и 10 нФ) и дифференциатора ($R_{\text{о.с}}=10$ и 50 кОм, $C=10$ и 5 нФ).

5. Рассчитать резонансную частоту f_0 и период T_0 избирательного усилителя (рис.5.13) при $R=24$ кОм и $C=1,1$ нФ.

6. Рассчитать длительность импульсов ($t_{и}$) и пауз ($t_{п}$), а также период повторения импульсов ($T_{п}$) выходного напряжения мультивибратора (рис.5.14) при $C=6,8$ нФ и $R_{о.с.}=16$ кОм.

7. Определить частоту и период выходного напряжения генератора гармонических колебаний (рис.5.15) при $R=24$ кОм и $C=1,1$ нФ.

Примечание: объем предварительного задания может быть уменьшен по указанию преподавателя.

Порядок выполнения эксперимента

При включенном стенде и отсутствии входного напряжения произвести балансировку усилителя потенциометром “установка 0”.

Для инвертирующего (рис.5.4) или неинвертирующего (рис.5.5) усилителя снять передаточные характеристики для заданных в предварительном задании значений $R_{о.с.}$. Входное напряжение снимается с источников опорного напряжения с полярностью “+” и “-”, устанавливаемой переключателями Π_1 и Π_2 . Уровень входного напряжения меняется в диапазоне от 0 до 1000 мВ. Результаты измерений занести в табл.5.1.

ТАБЛИЦА 5.1

| $U_{вх}$, мВ | 0 | | | | | | | 1000 |
|---|---|--|--|--|--|--|--|------|
| $U'_{вых}$, В при $R_{о.с.}=20$ кОм | 0 | | | | | | | |
| $U''_{вых}$, В при $R_{о.с.}=100$ кОм | 0 | | | | | | | |
| $U'''_{вых}$, В при $R_{о.с.}=270$ кОм | 0 | | | | | | | |

По результатам измерений построить передаточные характеристики. Недостающие характеристики в трех четвертях системы координат строятся по зеркальному отображению по отношению к снятым по табл.5.1. На построенных характеристиках нанести точки по предварительному расчету.

3. Собрать цепь вычитателя-усилителя согласно рис.5.6 и подать на входы от источников постоянного тока напряжения различные по уровню и знаку при различных значениях $R_{о.с.}$. Значения входных и выходного напряжений занести в табл.5.2.

4. а) Для инвертирующего (рис.5.7) или неинвертирующего (рис.5.8) цифрового сумматора произвести измерения входных и выходного напряжений для различных по знаку и величине входных напряжений при двух значениях $R_{о.с.}$. По п.п. 3,4 уровень входных напряжений брать в пределах ± 1 В. Результаты измерений занести в табл.5.2.

ТАБЛИЦА 5.2

| | $U_{\text{вх1}}, \text{ мВ}$ | $U_{\text{вх2}}, \text{ мВ}$ | $U_{\text{вых}}, \text{ мВ}$ | $R_{\text{о.с}}, \text{ кОм}$ | $U_{\text{вых}}, \text{ расч., мВ}$ |
|------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Вычитатель | | | | 10 | |
| | | | | 10 | |
| | | | | 20 | |
| Сумматор | | | | 20 | |
| | | | | 50 | |
| | | | | 100 | |

б) В геометрическом неинвертирующем сумматоре на входы подаются переменные напряжения: первое - с выхода симметричного мультивибратора стенда (включить источник питания 5В стенда), второе - с генератора низкочастотных сигналов (синусоидальный выход). Ослабление - 20. Частота 3-6 кГц. $R_{\text{о.с}}$ сумматора 10 или 20 кОм. Снять осциллограммы входных $u_{\text{вх}}(t)$ и выходного $u_{\text{вых}}(t)$ напряжений, по которым определить параметры входных сигналов (амплитуду, частоту, период). Произвести графическое сложение входных сигналов с коэффициентом усиления $k_u=2$.

5. По рис.5.9 и 5.10 на входы дифференциатора и интегратора подаются прямоугольные импульсы с выхода симметричного мультивибратора стенда. Снять осциллограммы и определить параметры входных $u_{\text{вх}}(t)$ импульсов (амплитуда, период, частота), а также снять осциллограммы выходных $u_{\text{вых}}(t)$ напряжений при следующих номинальных данных устройств: для дифференциатора - $C_{\text{вх}}=10$ и 5 нФ, $R_{\text{о.с}}=20$ и 30 кОм, $C_{\text{о.с}}=2$ нФ; для интегратора - $R_{\text{вх}}=10$ кОм, $C_{\text{о.с}}=10$ и 5 нФ, $R_{\text{о.с}}=20$ кОм. По снятым осциллограммам определить графическим способом постоянную времени τ и сравнить с результатами предварительного расчета.

6. Собрать схему линейного усилителя согласно рис.5.12 с подключением на вход генератора низкочастотных колебаний (синусоидальный выход). Снять амплитудную характеристику на частоте 1кГц в линейном режиме, который контролируется осциллографом на выходе усилителя, для значений $R_{\text{о.с}}=91$ и 270 кОм. Результаты эксперимента свести в табл.5.3.

ТАБЛИЦА 5.3

| | | | | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------|--|--|--|--|--|--|
| $R_{\text{о.с}} = 91 \text{ кОм}$ | $U_{\text{вх}}, \text{ мВ}$ | | | | | | |
| | $U_{\text{вых}}, \text{ В}$ | | | | | | |
| $R_{\text{о.с}} = 270 \text{ кОм}$ | $U_{\text{вх}}, \text{ мВ}$ | | | | | | |
| | $U_{\text{вых}}, \text{ В}$ | | | | | | |

По результатам измерений построить соответствующую характеристику $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$.

7. По рис.5.13 собрать схему избирательного усилителя. На вход подключается низкочастотный генератор сигналов на синусоидальном выходе с

уровнем выходного напряжения 90 мВ (входное для усилителя). Снять амплитудно-частотную характеристику $k_u(f)$ в диапазоне частот 4,5-7,5 кГц. Результаты эксперимента занести в табл.5.4.

ТАБЛИЦА 5.4

| $U_{\text{вх}} = 90\text{мВ}$ | | | | | | |
|-------------------------------|--|--|--|--|--|--|
| $f, \text{кГц}$ | | | | | | |
| $U_{\text{вых}}, \text{В}$ | | | | | | |
| k_u | | | | | | |

По результатам табл.5.4 построить АЧХ, определить резонансную частоту, которую сравнить с результатами предварительного расчета. По АЧХ определить f_n, f_v , полосу пропускания.

8. Согласно рис.5.14 и 5.15 при включенном питании стенда снять осциллограммы выходных $u_{\text{вых}}(t)$ напряжений мультивибратора и генератора гармонических колебаний, по которым определить параметры сигналов: амплитуду, частоту, период. Результаты эксперимента сравнить с результатами предварительного расчета.

9. На вход генератора линейно-изменяющегося напряжения (ГЛИН) по схеме рис.5.15 подать $u_{\text{вх}}$ от несимметричного мультивибратора. По осциллограммам $u_{\text{вх}}(t)$ и $u_{\text{вых}}(t)$ определить: для $u_{\text{вх}}$ - частоту, коэффициент заполнения, скважность импульсов, для $u_{\text{вых}}$ - амплитуду, длительность прямого (рабочего) хода, длительность обратного хода.

10. На вход компаратора (рис.5.17) подать синусоидальное напряжение от генератора сигналов при ослаблении “0”. Снять осциллограммы входного $u_{\text{вх}}(t)$ и выходного $u_{\text{вых}}(t)$ напряжений.

11. Для триггера Шмитта (рис. 5.18) при подаче на вход напряжения (по п.10) снять передаточную характеристику $u_{\text{вых}}(u_{\text{вх}})$ устройства.

Примечание: п.п.4б, 5, 9, 10, 11 выполнять, используя оба канала осциллографа (канал А - вход, канал Б - выход). **Внимание!** Перед включением осциллографа в схему обязательно проверьте положение входа “⊥” (общая точка схемы).

Содержание отчета

Цель работы, рабочие схемы исследуемых устройств, результаты предварительного расчета, характеристики, осциллограммы, рассчитанные параметры.

Контрольные вопросы

1. К какому классу усилителей относится ОУ? 2. Чем объясняется широкое использование ОУ? 3. Поясните структурную компоновку ОУ. 4. Что такое обратные связи в усилителях и как они используются при построении конкретных устройств на базе ОУ? 5. Какие основные характеристики ОУ и какой они имеют вид? 6. Где используют линейный и нелинейный режим усиления? 7. Поясните принцип построения инвертирующего и

неинвертирующего усилителя на базе ОУ. 8. Как определяется их коэффициент усиления? 9. Поясните принцип построения вычитателя, сумматора, дифференциатора, интегратора. Запишите формулы выполняемых операций. 10. Что такое “избирательный усилитель”? Особенности АЧХ. Что такое и как определяется полоса пропускания? 11. Основные принципы построения самовозбуждающихся устройств на базе ОУ. 12. Что такое частотно-зависимые цепи и в каких устройствах они используются? 13. Принцип построения и использование ГЛИНа. 14. Что такое “пороговые устройства”? 15. Какое принципиальное отличие при построении компаратора и триггера Шмитта на ОУ? 16. Поясните, что такое “гистерезис” в электронных цепях?

Лабораторная работа № 6

ЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ И МИКРОСХЕМЫ

Ц е л ь р а б о т ы : изучение принципов построения серийных логических микросхем; исследование логических функций одного и двух переменных и их реализация; построение простых устройств автоматики на базе логических и цифро-импульсных устройств.

Общие сведения

Л о г и ч е с к и е э л е м е н т ы (ЛЭ) широко применяются в автоматике, вычислительной технике и цифровых измерительных приборах. Их создают на базе электронных устройств, работающих в ключевом режиме, при котором уровни сигналов могут принимать только два значения. В положительной логике принято, что высокий уровень сигнала соответствует логической единице (1), а низкий – логическому нулю (0).

Все логические устройства можно разделить на две группы :

- 1) комбинационные, в которых выходные сигналы в данный момент однозначно определяются входными сигналами;
- 2) последовательностные, в которых выходные сигналы зависят не только от входных сигналов, но и от предыдущего состояния устройства.

Логическая функция выражает зависимость выходных логических переменных от входных и принимает значения 0 или 1. Любую логическую функцию удобно представить в виде таблицы состояний (таблицы истинности), где записываются возможные комбинации аргументов и соответствующие им функции.

Таблица 6.1

| Название функции | Обозначение функции | Значение x | |
|------------------|---------------------|--------------|---|
| | | 0 | 1 |
| Нулевая | y_0 | 0 | 0 |
| Повторение | y_1 | 0 | 1 |
| Инверсия | y_2 | 1 | 0 |
| Единичная | y_3 | 1 | 1 |

В общем случае число элементарных логических функций от n переменных равно 2^{2^n} . Так, при одной переменной возможны четыре функции (табл.6.1). Здесь единичная и нулевая функции не зависят от значения аргумента и являются постоянными. Двум переменным соответствует 16 функций: $2^{2^2} = 16$. В табл. 6.2 приведены основные логические функции двух переменных.

Работу логических устройств анализируют с помощью алгебры логики (булевой алгебры), где переменная может принимать только два значения: 0 или 1.

Основными логическими операциями являются (см. табл.6.2):

- 1) логическое умножение: $y = x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n$ (читается “и x_1 , и x_2, \dots , и x_n ”);
- 2) логическое сложение: $y = x_1 + x_2 + \dots + x_n$ (читается “или x_1 , или x_2, \dots , или x_n ”);
- 3) логическое отрицание: (читается “не x ”).

Как видно из табл. 6.2, выходной сигнал y элемента ИЛИ равен 1, если хотя бы один из его входов подан сигнал 1. Элемент И выдает 1, если на все входы поданы сигналы 1.

Все возможные логические функции n переменных можно образовать с помощью комбинации трех основных операций: И, ИЛИ, НЕ. Поэтому такой набор называют логическим базисом или функционально полным. Используя законы булевой алгебры (табл. 6.3), можно доказать, что таковыми являются наборы из одной функции И-НЕ, ИЛИ-НЕ.

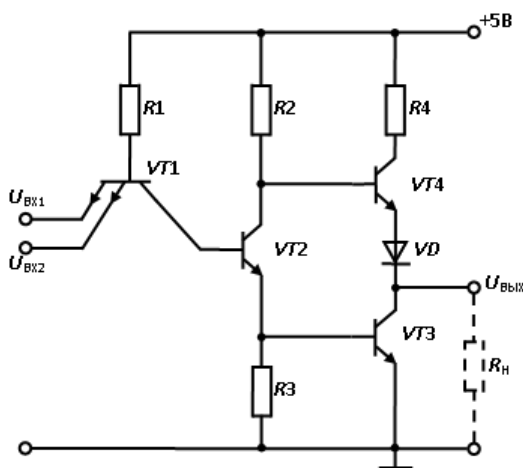


Рисунок 6.1 Реализация элемента И-НЕ

В базовых элементах одной серии использована одинаковая микросхемная реализация. Серия характеризуется общими электрическими, конструктивными и технологическими параметрами.

Интегральные микросхемы серии 155 представляют собой транзисторно-транзисторные логические (ТТЛ) элементы с 14 или 16 выводами. Базовым элементом серии является логический элемент И-НЕ, состоящий из многоэмиттерного транзистора $VT1$ и

сложного усилителя-инвертора (рис.6.1).

Если на входы ЛЭ поданы высокие положительные потенциалы $U_{\text{вх}}^1 \geq 2.4$ В, то переходы база-эмиттер $VT1$ закрываются, а через его открытый переход база-коллектор и резистор $R1$ протекает ток базы транзистора $VT2$, достаточный для его насыщения. При этом ток эмиттера $VT2$ открывает транзистор $VT3$ и подключает выход ЛЭ к общей шине. Вследствие падения напряжения на резисторе $R2$, а также за счет включения диода VD напряжение на переходе база-эмиттер транзистора $VT4$ оказывается недостаточным для его открывания.

ТАБЛИЦА 6.2

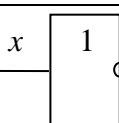
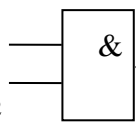
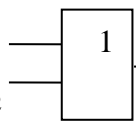
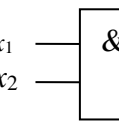
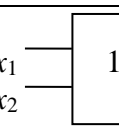
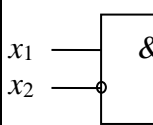
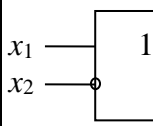
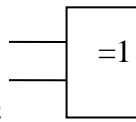
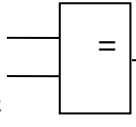
| Тип элемента | Логическая функция (операция) | Обозначение логической операции | Таблица истинности | | | | | Условное изображение |
|---|--|--|----------------------------|---|---|---|---|---|
| | | | x_1 | 0 | 0 | 1 | 1 | |
| | | | x_2 | 0 | 1 | 0 | 1 | |
| Элемент НЕ (инвертор) | Логическое отрицание, инверсия | \overline{x} $\neg x$ | x | 0 | | 1 | |  $y = \overline{x}$ |
| | | | \overline{x} | 1 | | 0 | | |
| Элемент И (конъюнктор) | Логическое умножение, конъюнкция | $x_1 \cdot x_2$ $x_1 \wedge x_2$ $x_1 \& x_2$ | $x_1 \cdot x_2$ | 0 | 0 | 0 | 1 |  $y = x_1 \cdot x_2$ |
| Элемент ИЛИ (дизъюнктор) | Логическое сложение, дизъюнкция | $x_1 + x_2$ $x_1 \vee x_2$ | $x_1 + x_2$ | 0 | 1 | 1 | 1 |  $y = x_1 + x_2$ |
| Элемент И-НЕ (элемент Шеффера) | Штрих Шеффера, отрицание конъюнкции | $\overline{x_1 \cdot x_2}$ $x_1 x_2$ | $\overline{x_1 \cdot x_2}$ | 1 | 1 | 1 | 0 |  $y = \overline{x_1 \cdot x_2}$ |
| Элемент ИЛИ-НЕ (элемент Пирса) | Стрелка Пирса, отрицание дизъюнкции | $\overline{x_1 + x_2}$ $x_1 \downarrow x_2$ | $\overline{x_1 + x_2}$ | 1 | 0 | 0 | 0 |  $y = \overline{x_1 + x_2}$ |
| Запрет x_2 | Запрет | $\overline{x_1 \cdot x_2}$ | $\overline{x_1 \cdot x_2}$ | 0 | 0 | 1 | 0 |  $y = x_1 \cdot \overline{x_2}$ |
| Импликация от x_2 к x_1 | Импликация | $\overline{x_1 + x_2}$ | $\overline{x_1 + x_2}$ | 1 | 0 | 1 | 1 |  $y = \overline{x_1 + x_2}$ |
| Исключающее ИЛИ (неравнознач ность,) | Исключающее ИЛИ | $x_1 \oplus x_2$ $\overline{x_1 x_2} + \overline{x_1} \overline{x_2}$ | $x_1 \oplus x_2$ | 0 | 1 | 1 | 0 |  $y = x_1 \oplus x_2$ |
| Равнознач ность (эквивалент ность) | Равнозначность | $x_1 \sim x_2$ $x_1 x_2 + \overline{x_1} \overline{x_2}$ | $x_1 \sim x_2$ | 1 | 0 | 0 | 1 |  $y = x_1 \sim x_2$ |

ТАБЛИЦА 6.3

| | | |
|---|--|--|
| Аксиомы (тождества) | $1 + x = 1$ $0 + x = x$ $x + x = x$ $x + \bar{x} = 1$ $\overline{\bar{x}} = x$ | $0 \cdot x = 0$ $1 \cdot x = x$ $x \cdot x = x$ $x \cdot \bar{x} = 0$ |
| Законы коммутативности | $x_1 + x_2 = x_2 + x_1$ $x_1 \cdot x_2 = x_2 \cdot x_1$ | |
| Законы ассоциативности | $x_1 + x_2 + x_3 = x_1 + (x_2 + x_3)$ $x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 = x_1 \cdot (x_2 \cdot x_3)$ | |
| Законы дистрибутивности | $x_1 \cdot (x_2 + x_3) = (x_1 \cdot x_2) + (x_1 \cdot x_3)$ $x_1 + (x_2 \cdot x_3) = (x_1 + x_2) \cdot (x_1 + x_3)$ | |
| Законы дуальности (теоремы де Моргана) | $\overline{x_1 + x_2} = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2$ $\overline{x_1 \cdot x_2} = \bar{x}_1 + \bar{x}_2$ | |
| Законы поглощения | $x_1 + x_1 \cdot x_2 = x_1$ $x_1 \cdot (x_1 + x_2) = x_1$ | |

Таким образом, напряжение на выходе ЛЭ не превышает напряжения насыщения транзистора $VT3$ (примерно 0,2 ... 0,4 В), что соответствует логическому 0.

Если хотя бы на одном из входов ЛЭ оказывается низкий потенциал, $U_{\text{вх}}^0 \leq 0,4 \text{ В}$, то через открытый переход база-эмиттер $VT1$ и резистор $R1$ протекает входной ток $I_{\text{вх}}^0 \leq 1,6 \text{ мА}$, а в базу $VT2$ попадает незначительный по величине обратный ток коллекторного перехода $VT1$. В этом случае транзисторы $VT2$ и $VT3$ заперты, а транзистор $VT4$ открыт и насыщен, так как в его базу протекает ток через резистор $R2$. Выход ЛЭ от шины питания +5 В получает высокий потенциал (логический уровень 1) через переходы $VT4$, диод VD и резистор $R4$.

Данный ЛЭ производит логическое умножение двух входных сигналов с одновременным инвертированием выходной величины (2И-НЕ).

Если в базовом элементе (рис.6.1) отсоединить элементы $R4$, $VT4$, VD , а в коллектор транзистора $VT3$ включить нагрузку, то вместо инвертирования обеспечивается повторение выходного сигнала.

В настоящее время применяется несколько разновидностей серий микросхем с элементами ТТЛ: стандартные (серии 133; К155), высокого быстродействия (серии 130; К131), микроощные (серия 134), с диодами Шоттки (серии 530; К531) и микроощные с диодами Шоттки (серия К555). Кроме расширения номенклатуры элементов серий К531 и К555 сейчас активно развиваются наиболее перспективные серии ТТЛШ - микроощная К1533 и быстродействующая К1531, выполненные на основе последних достижений

технологии изготовления ИС - ионной имплантации и прецизионной фотолитографии.

Наибольшим быстродействием обладают ЛЭ, выполненные по технологии ЭСЛ (эмиттерно-связанная логика) и ТТЛШ (транзисторно-транзисторная логика с транзисторами Шоттки). Меньше потребляет мощности КМДПТЛ (комплементарная МДП-транзисторная логика). Она же лучшая по помехоустойчивости и нагрузочной способности. ЭСЛ и И²Л (интегральная инжекционная логика) меньше других генерируют помехи.

В последние годы получили развитие программируемые логические элементы, на которых с помощью программаторов можно построить многие цифровые устройства.

Любая сложная логическая функция может быть реализована с помощью ЛЭ, выполняющих элементарные функции И-НЕ, ИЛИ-НЕ. Пусть требуется составить комбинационную схему с четырьмя входами x_1, x_2, x_3, x_4 и одним выходом y . Высокий уровень напряжения должен появляться на выходе только при наличии высоких уровней на трех входах, т.е. $y = 1$ при $x_1 = x_2 = x_3 = 1$ и $x_4 = 0$. Такую схему можно составить путем подбора элементов. Например, элемент 3И-НЕ при подаче на его входы $x_1 = x_2 = x_3 = 1$ дает на выходе сигнал $y_1 = 0$. Подавая его и $x_4 = 0$ на вход элемента 2ИЛИ-НЕ, получаем $y = 1$.

Другим способом является преобразование логической функции по правилам алгебры логики (см. табл. 6.3). Для данного примера $y = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \overline{x_4}$. Используя тождество $x = \overline{\overline{x}}$ и формулы де Моргана, эту функцию можно представить в виде:

$$y = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \overline{x_4} = \overline{\overline{x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \overline{x_4}}} = \overline{\overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} \cdot x_4} = \overline{\overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3}} + \overline{x_4}$$

Полученной логической функции соответствует схема рис.6.2.

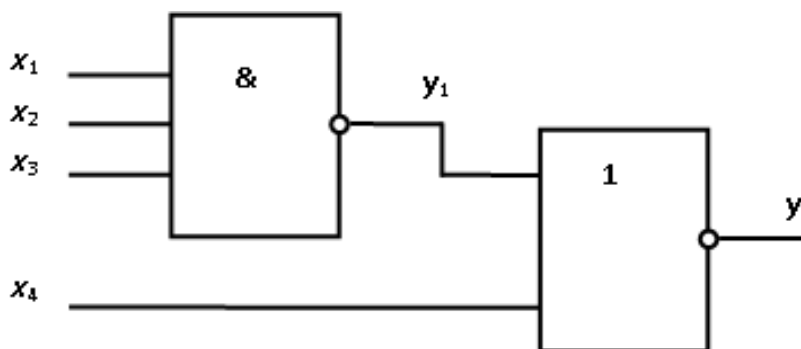


Рисунок 6.2 Схема на логических элементах

Предварительное задание к эксперименту

Составить на логических элементах 2И-НЕ (3И-НЕ) и 2ИЛИ-НЕ комбинационную схему, на выходе которой высокий уровень напряжения (логическая 1) появляется только при значениях сигналов на входах, заданных табл. 6.4.

ТАБЛИЦА 6.4

| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| x_1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| x_2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| x_3 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| x_4 | 0 | 0 | 1 | 1 | - | - | - | - |

Порядок выполнения эксперимента

1. Изучить принцип работы логических элементов (табл.6.2).
2. Подавая сигналы с наборного поля на входы логических элементов и соединяя их выходы с элементами индикации, реализовать основные функции одного и двух аргументов. Привести таблицы истинности исследуемых элементов.
3. Собрать схему предварительного задания, проверить правильность работы, составить таблицу истинности.
4. Осуществить выборку с наборного поля следующих чисел (по указанию преподавателя):

- | | |
|----------------------------------|------------------------------|
| а) всех четных | б) всех нечетных |
| в) всех чисел $8 \leq N \leq 15$ | г) всех чисел $N \leq 7$ |
| д) всех чисел, кратных 4 | е) чисел 0, 1, 2, 3 |
| ж) чисел 4, 5, 6, 7 | з) чисел 8, 9, 10, 11 |
| и) 3, 7, 11, 15 | к) 6, 7, 14, 15 |
| л) 4, 5, 12, 13 | м) 2, 6, 10, 14 |
| н) 2, 3, 10, 11 | о) 9, 11, 13, 15 |
| п) 8, 10, 12, 14 | р) 1, 5, 9, 13 |
| с) 1, 3, 9, 11 | т) 4, 6, 12, 14 |
| у) 10, 11, 14, 15 | ф) 1, 2, 5, 6, 9, 10, 13, 14 |
| х) 0, 3, 4, 7, 8, 11, 12, 15 | ц) 0-3, 8-11. |

5. Собрать схему, реализующую мажоритарную логику (на выходе появляется 1, если на всех трех или на любых двух входах имеется 1).

Содержание отчета

Цель работы; схема базового логического элемента; схема, составленная в предварительном задании; таблицы истинности исследуемых логических элементов; схемы по пп. 4, 5.

Контрольные вопросы

1. Какие операции и тождества алгебры логики Вы знаете?
2. Перечислите логические функции одного и двух аргументов, покажите примеры реализации.
3. Что представляет собой серия цифровых (логических) ИС?
4. Приведите примеры простейших цифровых устройств на основе логических элементов.
5. Реализуйте несколько функций, заданных таблицей истинности.
6. Какой набор логических элементов называют функционально полным (базовым)?
7. Поясните работу базового логического элемента.

Лабораторная работа № 7

КОМБИНАЦИОННЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ

Ц е л ь р а б о т ы : ознакомление с принципом действия и схемотехникой дешифраторов, мультиплексоров и сумматоров; изучение работы этих комбинационных логических схем; реализация на их основе простейших устройств автоматики.

Общие сведения

К о м б и н а ц и о н н ы м и называются логические устройства, выходные сигналы которых однозначно определяются комбинацией входных сигналов в тот же момент времени. Они используются в информационно-измерительных системах и ЭВМ, в системах автоматического управления, в устройствах промышленной автоматики и т.п.

Построение к о м б и н а ц и о н н о г о л о г и ч е с к о г о у с т р о й с т в а осуществляется следующим образом. По требуемому алгоритму работы составляются таблица истинности и соответствующее ей логическое уравнение. Это уравнение минимизируется по правилам алгебры логики с целью упрощения и затем строится логическая схема на базе логических элементов (ЛЭ) И-НЕ, ИЛИ-НЕ. Наряду с построением устройств промышленность изготавливает наиболее часто встречающиеся к о м б и н а ц и о н н ы е л о г и ч е с к и е с х е м ы (КЛС) в виде интегральных микросхем. Примерами КЛС являются шифраторы, дешифраторы, кодопреобразователи, устройства сравнения (компараторы), мультиплексоры, демультиплексоры, сумматоры, арифметико-логические устройства и др.

Д е ш и ф р а т о р (декодер) представляет собой комбинационное устройство, в котором при каждой комбинации входных переменных формируется сигнал высокого или низкого уровня только на одном выходе. Дешифратор называется полным, если число выходов n равно числу возможных наборов сигналов на m входах, т.е. $n = 2^m$. Неполный дешифратор имеет меньшее число выходов. Дешифратор может иметь стробирующий (управляющий) вход. Сигнал на этом входе разрешает или запрещает выполнение операции дешифрования.

Исследуемая ИМС К155ИД3 (рис.7.1) представляет собой дешифратор-демультиплексор с 4 на 16. Основу этой микросхемы составляют 16 ЛЭ 5И-НЕ и 8 инверторов. Работа дешифратора определяется таблицей истинности (табл. 7.1). Дешифратор реализует логические функции:

$$F_0 = \bar{A}_3 \bar{A}_2 \bar{A}_1 \bar{A}_0; F_1 = \bar{A}_3 \bar{A}_2 \bar{A}_1 A_0; F_2 = \bar{A}_3 \bar{A}_2 A_1 \bar{A}_0; \dots; \\ F_{15} = A_3 A_2 A_1 A_0 .$$

Он позволяет преобразовать четырехразрядный двоичный код, поступивший на входы $A_0...A_3$, в напряжение низкого уровня, появляющееся на одном из шестнадцати выходов $\bar{0}...1\bar{5}$. Если входные переменные представить

как двоичную запись чисел, то логический нуль формируется на том выходе, номер которого соответствует десятичной записи того же числа (см.табл.7.1). Кроме четырех входов $A0...A3$ устройство имеет еще два входа $\bar{W}1$ и $\bar{W}2$ разрешения дешифрации. Они играют роль стробирующих входов, если на них подан низкий уровень напряжения. Если хотя бы на одном из входов $\bar{W}1$ и $\bar{W}2$ установить высокий уровень, то на всех выходах будет высокий уровень напряжения. Такой режим используется при наращивании числа разрядов дешифрируемого кода.

ТАБЛИЦА 7.1

| Входы | | | | | | Выходы | | | | | | |
|-------|---|------|------|------|------|-----------|-----------|-----------|-----|------------|------------|------------|
| | | $A3$ | $A2$ | $A1$ | $A0$ | $\bar{0}$ | $\bar{1}$ | $\bar{2}$ | ... | $\bar{13}$ | $\bar{14}$ | $\bar{15}$ |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | ... | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | ... | 1 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | ... | 1 | 1 | 1 |
| | | | | | | | | | ... | | | |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | ... | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | ... | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | ... | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | x | x | x | x | 1 | 1 | 1 | ... | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | x | x | x | x | 1 | 1 | 1 | ... | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | x | x | x | x | 1 | 1 | 1 | ... | 1 | 1 | 1 |

Примечание: здесь и далее x — любое значение сигнала.

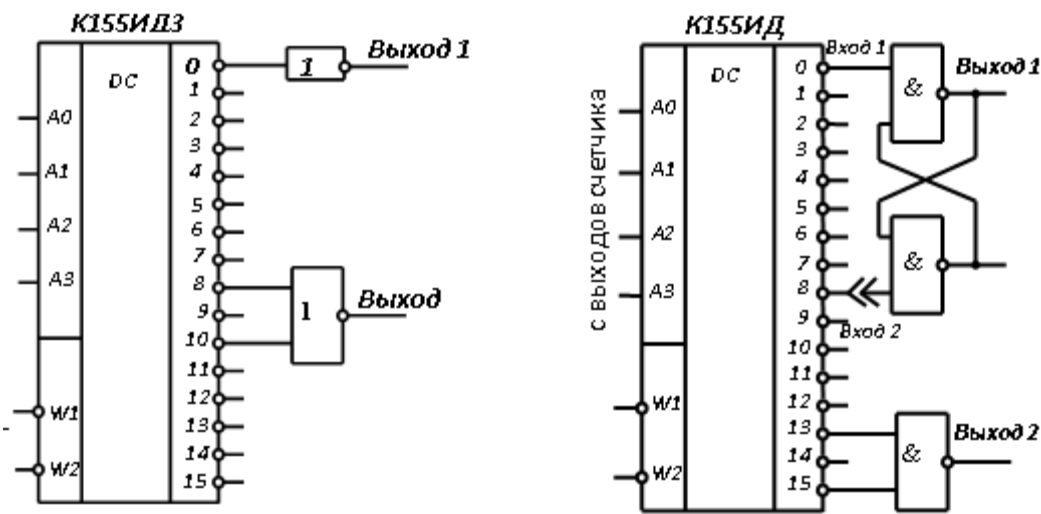


Рисунок 7.4

Входы $\bar{W}1$ и $\bar{W}2$ можно использовать как логические, тогда микросхема ИДЗ служит демультиплексором данных. Входы $A0...A3$ в этом случае используются как адресные, чтобы направить поток данных, принимаемых входами $\bar{W}1$ или $\bar{W}2$, на один из выходов. Подобные задачи возникают при дистанционном управлении, в преобразователях последовательного кода в параллельный и т.п.

Принцип выбора “1 из n ” используется для управления индикаторами в

устройствах отображения информации, в различных схемах распределителей импульсов по нескольким каналам (в данном случае - до 16). Как видно из рис.7.1, на выходе 1 высокий логический уровень появится только при кодовом наборе 0000, на выходе 2 - при наборах 1000 или 1010.

Если в системах управления применяется генератор тактовых импульсов и четырехразрядный счетчик, то дешифратор можно использовать в качестве делителя частоты (см. рис.7.1) или формирователя импульсов (рис.7.2), благодаря цикличности "перемещения" логических уровней по выходам. Формирование конечной последовательности импульсов может осуществляться различными способами (см. рис.7.2). Например, на выходе 1 длительность сформированного импульса равна половине цикла, т.к. переключение $\overline{R}\overline{S}$ -триггера происходит при прохождении нулевого сигнала на выходах 0 и 8 дешифратора. При выборе других точек подключения входа 2 скважность ($q=T_{\text{цикла}}/t_{\text{имп}}$) можно изменять в широких пределах (от 1,1 до 16). В другом примере на рис.7.2 показан простой способ получения пакета из двух импульсов на выходе одного ЛЭ. Аналогичная схемотехника используется и для формирования последовательности импульсов различной длительности.

Мультиплексор (управляемый кодом переключатель) предназначен для коммутации одного из m входов на выход. Входы мультиплексора (m - информационных и k - управляющих) находятся в следующем соответствии: $m=2^k$. Выход обычно один, он может быть прямым или инверсным.

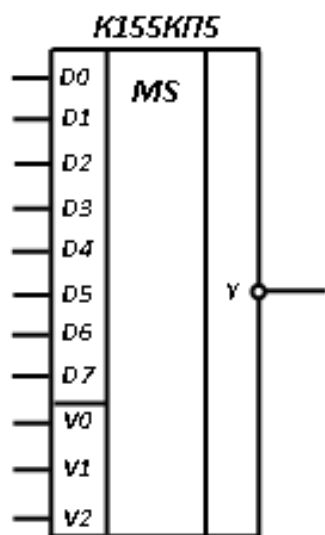


Рис. 7.3

Микросхема K155КП5 представляет собой восьмиканальный мультиплексор без стробирования (рис.7.3). Основу его схемы составляет один ЛЭ 4И-8ИЛИ-НЕ и 6 простых инверторов. Он имеет 8 информационных входов $D0... D7$, 3 адресных входа $V0... V2$ и выход.

Логическое уравнение имеет вид:

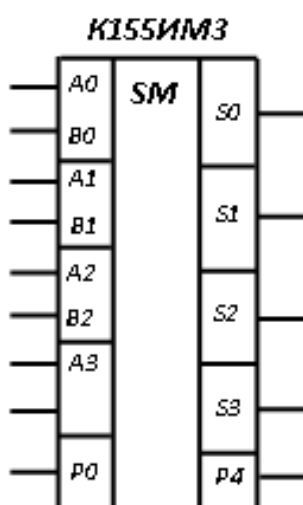
$$\overline{Y} = D_0\overline{V}_2\overline{V}_1\overline{V}_0 + D_1\overline{V}_2\overline{V}_1V_0 + D_2\overline{V}_2V_1\overline{V}_0 + D_3\overline{V}_2V_1V_0 + D_4V_2\overline{V}_1\overline{V}_0 + D_5V_2\overline{V}_1V_0 + D_6V_2V_1\overline{V}_0 + D_7V_2V_1V_0.$$

Состояние мультиплексора определяется таблицей истинности (табл. 7.2). Как видно из таблицы, мультиплексор выполняет функции простого инвертора только по тому каналу, номер которого соответствует двоичному коду адресных входов. Поэтому мультиплексор нашел широкое применение в качестве преобразователя параллельного кода в последовательный, для передачи информации по линиям связи и для последовательного опроса (контроля) при большом числе каналов или устройств.

ТАБЛИЦА 7.2

| Адресные входы | | | Информационные входы | | | | | | | | Выход д |
|----------------|-----|-----|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|---------|
| V2 | V1 | V0 | D0 | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 | D7 | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | x | x | x | x | x | x | x | 1 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | x | x | x | x | x | x | x | 0 |
| 0 | 0 | 1 | x | 0 | x | x | x | x | x | x | 1 |
| 0 | 0 | 1 | x | 1 | x | x | x | x | x | x | 0 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 1 | 1 | 1 | x | x | x | x | x | x | x | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | x | x | x | x | x | x | x | 1 | 0 |

ТАБЛИЦА 7.3

Рисунок 7.4
Сумматор

| Входы | | | Выходы | |
|-------|-------|-------|--------|-----------|
| A_i | B_i | P_i | S_i | P_{i+1} |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Сумматор предназначен для сложения двух чисел, заданных в двоичном коде. Число входов и выходов сумматора определяется разрядностью слагаемых. Одноразрядный двоичный сумматор характеризуется таблицей истинности (табл.7.3). Такой сумматор называется полным, т.к. обрабатывает сигнал переноса с предыдущего разряда P_i и выдает сигнал переноса на последующий разряд P_{i+1} . Схемотехника сумматоров строится на ЛЭ "Исключающее ИЛИ" (функция "неравнозначность") для суммирования и ЛЭ И-НЕ для переноса:

$$P_{i+1} = A_i B_i + (A_i \oplus B_i) P_i; \quad S_i = (A_i \oplus B_i) \oplus P_i.$$

Микросхема K155ИМ3 (рис. 7.4) представляет собой четырехразрядный сумматор с параллельным поразрядным сложением и последовательным формированием сигнала переноса. Он имеет два четырехразрядных числа по входам данных $A0...A3$ и $B0...B3$, а по входу $P0$ - сигнал переноса с предыдущего разряда. Сумма разрядов входных чисел появляется на выходах $S0...S3$. На выходе $P4$ выделяется сигнал переноса на последующий разряд.

Суммирование происходит по уравнению:

$$P_0 + 2^0(A_0 + B_0) + 2^1(A_1 + B_1) + 2^2(A_2 + B_2) + 2^3(A_3 + B_3) = 2^0S_0 + 2^1S_1 + 2^2S_2 + 2^3S_3 + 2^4P_4.$$

Сумматор можно использовать для вычитания чисел. Для этого вычитаемое представляют в дополнительном коде, который образуется из обратного (инверсного) кода добавлением к нему единицы. Так, четырехразрядное число B , записанное в прямом коде $B_{пр} = B_3B_2B_1B_0$, может быть представлено в обратном коде $B_{обр} = \bar{B}_3\bar{B}_2\bar{B}_1\bar{B}_0$ и в дополнительном коде $B_{доп} = B_{обр} + 1$.

Операцию вычитания можно представить в виде

$$A_{пр} - B_{пр} = A_{пр} + B_{доп} - 10000.$$

Сумматор может работать и как компаратор чисел. Для этого второе сравниваемое число подают в обратном коде (например, через инверторы). Тогда при $A = B$ на выходах $S_0 = S_1 = S_2 = S_3 = 1$, $P_4 = 0$; при $A > B$ - $P_4 = 1$.

Разрабатываемые схемы будут проще, если учесть, что при использовании микросхем 155 серии на неподключенных входах генерируются 1, поэтому достаточно подключать с наборного поля только нулевые сигналы.

Предварительное задание к эксперименту

ТАБЛИЦА 7.4

| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Количество импульсов в пакете | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 3 |
| Длительность одиночного импульса, с | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 4 | 1 |
| Период повторения пакета, с | 8 | 16 | 8 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 |
| A | 3 | 5 | 7 | 9 | 10 | 12 | 13 | 15 |
| B | 15 | 14 | 13 | 12 | 7 | 10 | 8 | 4 |

1. Изучить принцип работы дешифратора К155ИДЗ, мультиплексора К155КП5 и сумматора К155ИМ3.

2. Используя микросхемы К155ЛА3 (4 ЛЭ 2И-НЕ), К155ЛА4 (3 ЛЭ 3И-НЕ), К155ЛН1 (6 ЛЭ НЕ), К155ЛР1 (2 ЛЭ 2И-2ИЛИ-НЕ) составить схему включения дешифратора в качестве формирователя пакета импульсов с параметрами, заданными табл.7.4. Частота переключения генератора тактовых импульсов равна 1 Гц.

3. Составить схему включения мультиплексора, реализующую мажоритарную логику (на выходе появляется 1, если на всех трех или на любых двух адресных входах имеется 1).

4. Перевести в двоичный код и сложить два числа A и B , заданных табл.7.4.

Порядок выполнения эксперимента

1. Исследовать работу дешифратора в качестве преобразователя кодов. Проверить таблицу соответствия между логическими уровнями на выходах и кодовыми наборами на входах (табл. 7.1).

2. Собрать схему включения дешифратора, составленную в предварительном задании и проверить ее работоспособность. Нарисовать временные диаграммы.

3. Исследовать работу мультиплексора, для этого подать сигналы на информационные входы $D0...D7$ с выходов дешифратора $\bar{0}...\bar{7}$, а адресные входы $V0...V2$ соединить с шинами наборного поля. Проверить таблицу состояний (табл. 7.2).

4. Собрать схему включения мультиплексора, реализующую мажоритарную логику, и проверить ее работоспособность. Нарисовать временные диаграммы.

5. Исследовать работу сумматора, набрав на входах двоичные числа A и B . Проверить результат суммирования, полученный в предварительном задании.

6. Факультативно. Использовать сумматор в качестве вычитателя и компаратора чисел A и B . Пояснить результаты.

7. Собрать схему сигнализации нулевого результата сложения ($S0=S1=S2=S3=0$), используя имеющиеся на лабораторном стенде ЛЭ и один элемент индикации.

Содержание отчета

Цель работы; таблицы истинности дешифратора и мультиплексора; составленные в предварительном задании схемы включения дешифратора с временными диаграммами; результаты сложения вычитания и сравнения заданных чисел A и B ; схема сигнализации нулевого результата сумматора.

Контрольные вопросы

1. Чем отличаются КЛС от ЛЭ? Дайте сравнительный анализ на конкретных примерах. 2. Объясните назначение и области применения дешифратора. 3. Каков принцип работы исследуемого дешифратора? 4. Каким образом с помощью мультиплексора можно обеспечить постоянный обегаящий контроль 6 различных каналов или выходов ЛЭ? 5. Равноценны ли по своему функциональному назначению управляющие входы дешифратора и адресные входы мультиплексора? 6. Объясните принцип действия сумматора. 7. Как реализуется вычитание двоичных чисел?

Лабораторная работа № 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИГГЕРНЫХ СХЕМ

Ц е л ь р а б о т ы: изучение схем и функциональных возможностей основных типов триггеров; экспериментальное изучение триггеров и схем управления.

Общие сведения

Т р и г г е р а м и называют электронные устройства, обладающие двумя состояниями устойчивого равновесия и способные под воздействием управляющего сигнала переходить скачком из одного состояния в другое. Каждому состоянию триггера соответствует определенный (высокий или низкий) уровень выходного напряжения, который может сохраняться как угодно долго. Поэтому триггеры относятся к цифровым автоматам с памятью. В настоящее время триггеры выполняются на основе логических элементов в виде интегральных микросхем (ИМС). Они включены почти во все серии ИМС.

Триггеры применяются как переключающие элементы самостоятельно или входят в состав более сложных цифровых устройств, таких как счетчики, делители частоты, регистры и др.

В общем случае триггер имеет два выхода: прямой (Q) и инверсный (\bar{Q}), сигналы на которых противоположны по уровню. Количество входов триггера зависит от его типа. Входы делятся на информационные и командные.

По способу записи информации триггеры делятся на **а с и н х р о н н ы е**, у которых информационные и командные входы совмещены, и **с и н х р о н н ы е** или **т а к т и р у е м ы е**. Последние срабатывают только при поступлении на один из командных входов (синхровход) разрешающего импульса.

По числу ступеней триггеры делятся на **о д н о т а к т н ы е** и **д в у т а к т н ы е**. В одноктактных информация на выходах появляется практически одновременно с приходом информационного или синхроимпульса. Такие схемы срабатывают по перепаду сигнала 0-1 (по фронту синхроимпульса). В двухтактных триггерах переключение элементов происходит в два приема и сигнал на выходе появляется с задержкой. Они срабатывают по перепаду сигнала 1-0 (по спаду импульса).

В зависимости от логической структуры схемы управления различают RS -, D -, T -, JK -триггеры и др.

Работа триггера может быть описана логическим уравнением, связывающим состояние входов и выходов триггера до его срабатывания (t) и после срабатывания ($t+1$). Состояние триггера можно задать таблицей переходов или временной диаграммой его работы.

А с и н х р о н н ы й RS - т р и г г е р имеет два установочных входа R и S . Схема триггера на ЛЭ 2ИЛИ-НЕ и его условное обозначение показаны на рис.8.1. При $S = R = 0$ схема устойчива. Это режим хранения информации.

Если $Q = 1$, то на входах $DD2$ оказываются 1 и 0, при которых $\bar{Q} = 0$.

ТАБЛИЦА 8.1

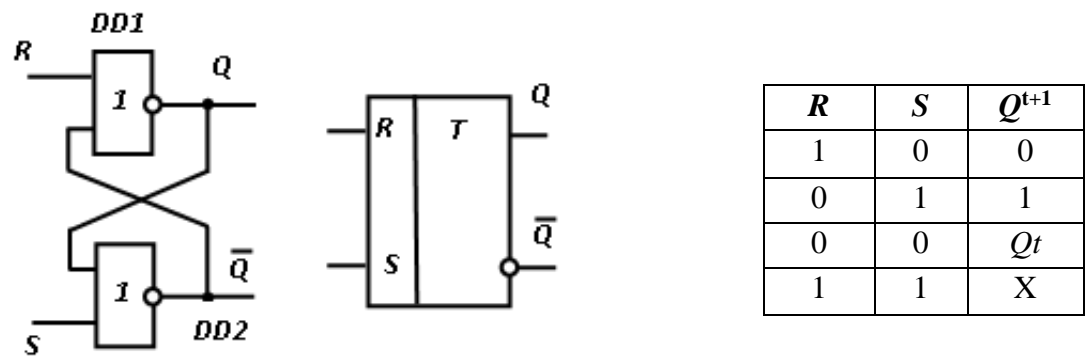


Рисунок 8.1 RS -триггер
структура, обозначение, таблица состояний

На входах $DD1$ - 0,0, что сохраняет этот элемент в состоянии $Q=1$. Для изменения состояния триггера на его входы надо подать комбинацию сигналов $R=1, S=0$. Тогда на входе $DD1$ появится высокий уровень и этот элемент перейдет в состояние $Q=0$. На входах $DD2$ установятся сигналы 0, 0 и логический элемент перейдет в состояние $Q = 1$. Комбинация $S=1, R=0$ возвратит триггер в состояние $Q=1, \bar{Q}=0$. При комбинации $S=1, R=1$ состояние триггера неопределенно, эта комбинация запрещена. Работа триггера иллюстрируется таблицей переключений (табл.8.1). Триггер с таким же законом работы можно выполнить на логических элементах 2И-НЕ.

С и н х р о н н ы е RS - т р и г г е р ы имеют два информационных входа R и S и синхровход C . Схема триггера и его условное обозначение показаны на рис.8.2. Асинхронный RS - триггер дополнен схемой управления на ЛЭ $DD1-2$, которая формирует сигналы q и \bar{q} , поступающие на его установочные входы. Управление осуществляется низким уровнем сигнала (0), поэтому на входах показан знак инверсии. При $\bar{C}=1$ любая комбинация \bar{R} и \bar{S}

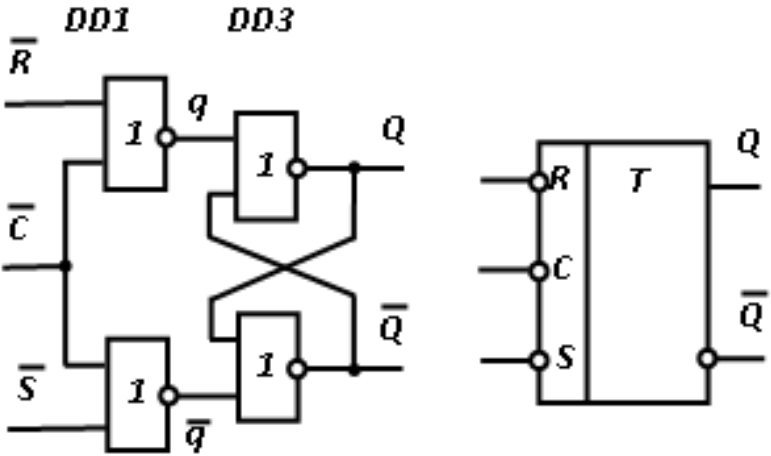


Рисунок 8.2
Синхронный RS-триггер

дает на выходах $q = \bar{q} = 0$, и асинхронный триггер на элементах $DD3-4$ находятся в режиме хранения информации. Схема управления сработает только при поступлении низкого уровня на синхровход ($\bar{C}=0$). Тогда $\bar{R}=1$ и $\bar{S}=0$ приведет к $q = 0$ и $\bar{q}=1$. Триггер перейдет в состояние $Q=1$, а при $\bar{R}=0$,

$\bar{S}=1$ - в состоянии $Q=0$. Комбинация $\bar{R}=\bar{S}=\bar{C}=0$ запрещена. Так как при $\bar{C}=1$ любое изменение сигналов на входах игнорируется, синхронные триггеры защищены от воздействия помех.

Синхронный D -триггер состоит из асинхронного RS -триггера и схемы управления на ЛЭ. Он имеет информационный вход D и синхровход C . Его схема и условное обозначение показаны на рис.8.3. ЛЭ $DD3-4$ представляют собой RS -триггер, управляемый инверсными сигналами.

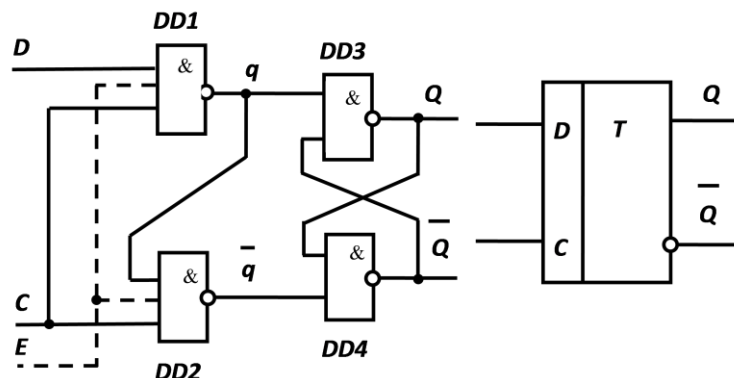


Рисунок 8.3
Синхронный D – триггер

Его устойчивое состояние обеспечивается комбинацией $q = \bar{q} = 1$. При $C=0$ на выходах обоих ЛЭ И-НЕ $DD1-2$ независимо от значения сигнала на входе D будут поддерживаться высокие уровни и триггер сохраняет предыдущее состояние. С приходом синхроимпульса $C=1$, при $D=1$ $q=0$, $\bar{q}=1$, и RS -триггер оказывается в состоянии $Q=1$. При $D=0$ $q=1$, $\bar{q}=0$, и триггер переходит в состояние $Q=0$. Это значение не может измениться до прихода следующего синхроимпульса. Поэтому D -триггеры называют триггерами задержки - они задерживают информацию на такт. На схеме пунктиром показан вход E , объединяющий два дополнительных И-входа. Этот вход расширяет возможности схемы. Его называют разрешающим. При $E=1$ триггер работает в нормальном режиме, $E=0$ дает возможность сохранить информацию при изменении сигналов на D - и C -входах.

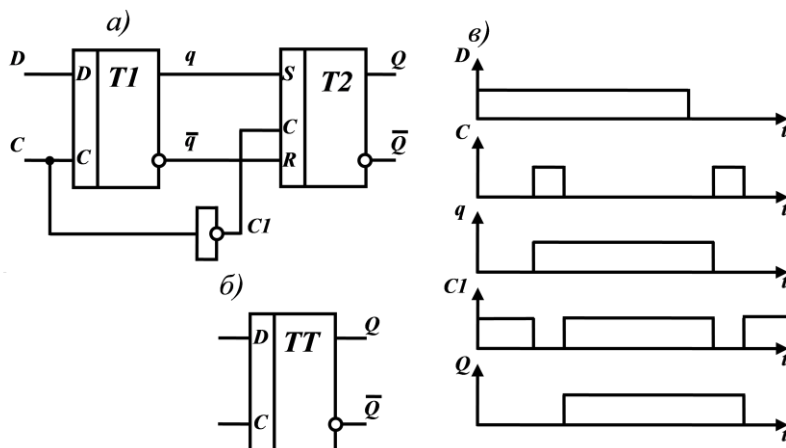


Рисунок 8.4
Двухтактный D - триггер

Широкое применение получили д в у х т а к т н ы е D -т р и г г е р ы. Схема и условное обозначение приведены на рис.8.4 а, б. Он состоит из D -триггера и синхронного RS -триггера с объединенными через инвертор S -входами.

Принцип работы триггера можно проследить по временной диаграмме (рис.8.4в). Сигнал со входа D записывается в $T1$ по фронту синхроимпульса. При этом $C1 = 0$ и $T2$ сохраняет прежнюю информацию. После окончания синхроимпульса $C=0$, и $T1$ отключается от D -входа, $C1 = 1$ и $T2$ переписывает информацию из $T1$.

JK -т р и г г е р является универсальным. Его условное обозначение приведено на рис.8.5а. Он имеет два установочных входа R и S , информационные входы J и K и синхровход C .

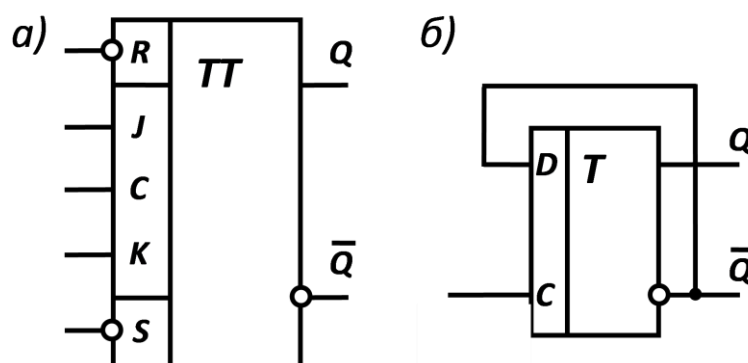


Рисунок 8.5

а) JK -триггер

б) реализация T - на базе D - триггера

Установочные входы обладают приоритетом над другими. С их помощью триггер устанавливают в состояние $Q=1$ или $Q=0$ независимо от сигналов на всех других входах. J - и K -входы работают по разрешающему импульсу на C -входе. При комбинации $J=1$ и $K=0$ на выходе $Q=1$. При $J=0$ и $K=1$ триггер переходит в состояние $Q=0$, а если $J=K=1$, то с приходом каждого синхроимпульса он меняет состояние. Работу триггера можно описать логическим уравнением

$$Q_{t+1} = J_t \cdot \bar{Q}_t + \bar{K}_t \cdot Q_t$$

На основе JK -триггера можно построить любой другой тип триггера. Поэтому они массово производятся практически во всех сериях ИМС.

T -т р и г г е р или с ч е т н ы й т р и г г е р имеет один информационный вход T . Каждый импульс на этом входе переводит его в новое состояние. Это соответствует работе JK -триггера при $K=J=1$.

Такой же триггер можно получить на основе D -триггера (рис.8.5б). Поэтому производить T -триггеры в виде самостоятельных изделий нет смысла и их нет в сериях ИМС.

T -триггеры используются как делители частоты на 2 или счетчики по модулю 2.

Предварительное задание к эксперименту

ТАБЛИЦА 8.2

| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------------|---------------|--------------------|--------------------|----------------|
| Тип триггера | Синхронный RS | Однотактный D | Двухтактный D | Двухтактный D |
| Тип ИМС | K155ЛА3 | K155ЛА3 | K155ЛА3 K155ТМ2 | K155ТВ1 |
| Вариант | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Тип триггера | T | T | T | Асинхронный RS |
| Тип ИМС | K155ТВ1 | K155ЛА3 K155ТМ2 | K155ЛА3 K155ТВ1 | K155ЛА3 |

Составить схему триггера, заполнить таблицу переключений, начертить временную диаграмму его работы. Тип триггера и ИМС, которые можно использовать, приведены в табл.8.2.

Порядок выполнения эксперимента

1. Используя логические элементы K155ЛА3, собрать схему асинхронного RS-триггера. Подать с наборного поля сигналы на его входы, выходы подключить к светодиодам. Перебирая комбинации сигналов на входах, заполнить таблицу переключений.

2. Проверить работу D-триггера на ИМС K155ТМ2. Информационный вход D включить к наборному полю, а синхровход C к источнику импульсов (переключатель режима работы в положении «Ручное»). Заполнить таблицу переключений, отметив момент переключения триггера (0-1 или 1-0).

3. Проверить работу JK-триггера на ИМС K155ТВ1. Подключить установочные входы R, S и информационные J, K к наборному полю, а синхровход C к генератору импульсов (переключатель режима работы в положении - «Ручное»). Заполнить таблицу переключений, отметив моменты переключения триггера (0-1 или 1-0).

4. Собрать схему триггера согласно предварительного задания и проверить его работу. Сравнить с результатами, полученными в предварительном задании.

5. Исследовать работу триггера K155ТМ2 в режиме T-триггера. На информационный вход подать сигнал от генератора импульсов (переключатель режима работы в положении 1000 Гц). Включить осциллограф и зарисовать осциллограммы входного и выходного напряжений. Определить период входных и выходных импульсов и частоту их следования f_1 и f_2 .

6. Включить последовательно два T-триггера на ИМС K155ТМ2. Определить частоту следования выходных импульсов f_3 . Проверить соотношения f_1/f_2 и f_1/f_3 .

Содержание отчета

Цель работы; схема триггера, составленная по предварительному заданию, временные диаграммы, таблицы переходов; схема соединений входов и выходов D -триггера для получения T -триггера; схема соединений входов JK -триггера для получения D - и T -триггера; осциллограммы импульсов на входе и выходе T -триггера и делителя частоты с указанием масштаба напряжения и времени.

Контрольные вопросы

1. Что называют триггером? 2. Как классифицируются триггеры по способу записи информации и по функциям? 3. Как работают RS -триггеры? 4. Чем отличаются двухтактные триггеры от одноктактных? 5. Зачем нужен разрешающий вход E ? 6. Почему JK -триггеры называют универсальными? 7. Для чего используют T -триггеры? 8. Как получить T -триггер на основе D - или JK -триггеров? 9. Начертите схему делителя частоты на 8. Поясните его работу на временной диаграмме.

Лабораторная работа № 9

СЧЕТЧИКИ ИМПУЛЬСОВ И РЕГИСТРЫ

Ц е л ь р а б о т ы : изучение устройства и работы счетчиков импульсов и регистров.

Общие сведения

С ч е т ч и к – это последовательностное устройство, которое может иметь не более чем 2^n внутренних состояний, где n - число триггеров, входящих в состав счетчика. Счетчики используются для подсчета числа двоичных импульсов. В ЭВМ они применяются для формирования адресов, подсчета количества циклов и т.д.

Основным параметром счетчика является **к о э ф ф и ц и е н т** или **м о д у л ь с ч е т а** K - это наибольшее число импульсов, которое может быть подсчитано счетчиком и равное максимальному числу внутренних состояний 2^n . В зависимости от модуля счета различают двоичные ($K=2^n$, где n - число триггеров), декадные или десятичные ($K=10^m$, где m - число десятичных разрядов), с произвольным постоянным и с переменным модулем.

По способу изменения выходного кода счетчики делятся на **с у м м и р у ю щ и е**, **в ы ч и т а ю щ и е** и **р е в е р с и в н ы е**. У суммирующего счетчика выходной код увеличивается на единицу для каждого нового состояния, а у вычитающего - уменьшается на единицу. Реверсивный счетчик может работать в обоих режимах.

По способу управления внутренними триггерами счетчики подразделяются на **а с и н х р о н н ы е** (последовательные) и **с и н х р о н н ы е** (параллельные).

В **а с и н х р о н н ы х** счетчиках переключение последующего триггера осуществляется выходным сигналом предыдущего, а входные счетные импульсы приходят на вход только младшего (нулевого) триггера.

Рассмотрим работу асинхронного суммирующего счетчика, выполненного на четырех JK -триггерах (рис.9.1, а). Работу счетчика однозначно определяет таблица состояний (табл.9.1) или временная диаграмма (рис.9.1, б).

В исходном состоянии на объединенные входы R всех триггеров подается низкий уровень сигнала ($R=0$) для предварительного обнуления счетчика и установки на всех прямых выходах логического нуля: $Q_1=Q_2=Q_3=Q_4=0$

Счетные импульсы приходят на вход первого триггера $T1$. Выходами счетчика являются прямые выходы триггеров, с которых информация о состоянии предыдущего триггера передается на синхровход последующего. Значение переменной Q_i соответствующего разряда счетчика изменяется, когда переменная в соседнем младшем разряде Q_{i-1} переходит из состояния “1” в “0” (см. табл.9.1). Для реализации этого свойства последовательного счетчика JK -триггеры в схеме работают в режиме T -триггера с переключением в новое состояние по спаду входного синхроимпульса. Таким образом, частота выходного сигнала каждого триггера в два раза меньше, чем частота сигнала на его входе (см. рис.9.1, б). Счетчик на выходах формирует нарастающие

кодовые наборы от 0000 до 1111, являющиеся двоичными эквивалентами десятичных чисел от 0 до 15. Шестнадцатый импульс переводит все триггеры в исходное нулевое состояние ($K=2^4=16$).

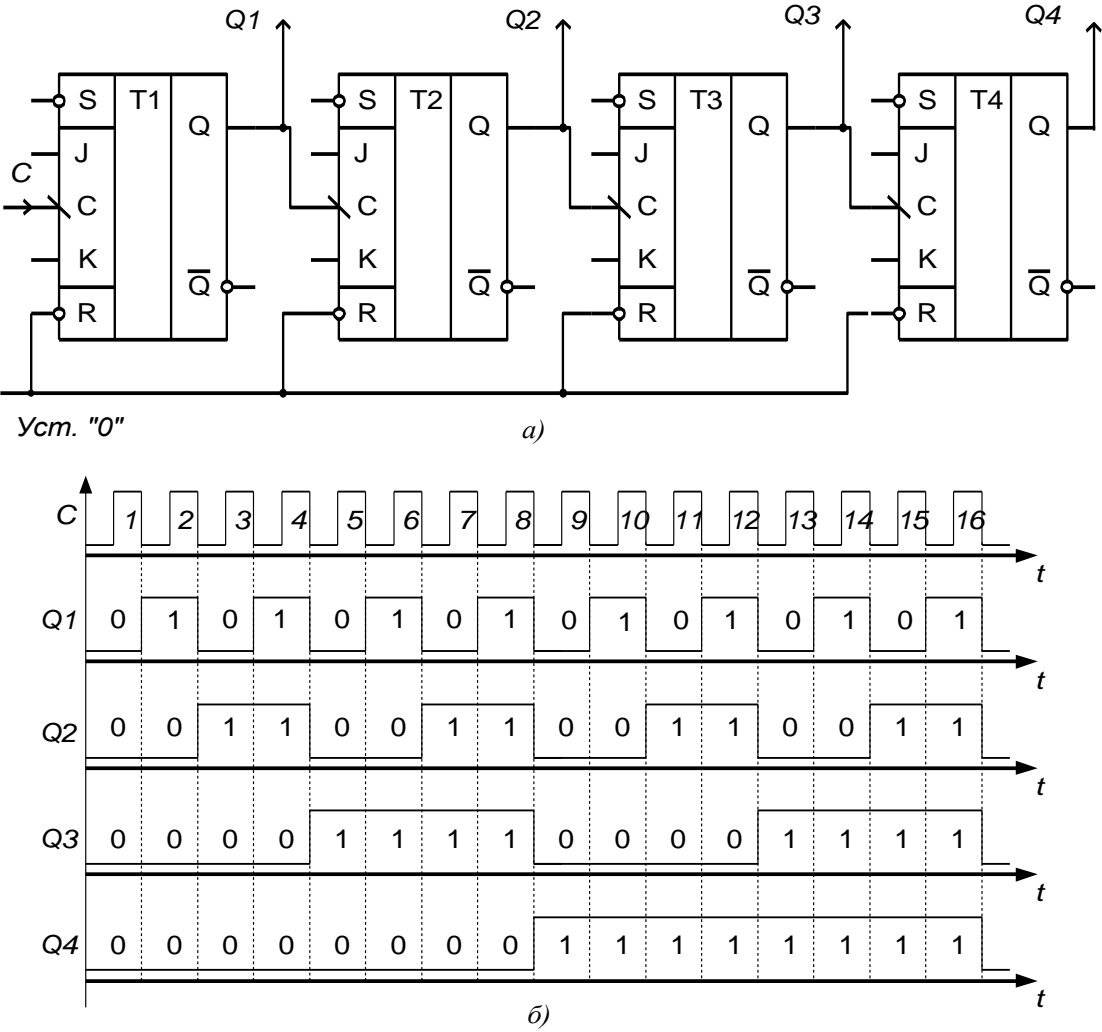


Рисунок 9.1
Суммирующий счетчик, а) структура, б) временная диаграмма

ТАБЛИЦА 9.1

| Число импульсов | Состояние прямых выходов | | | |
|-----------------|--------------------------|-------|-------|-------|
| | Q_4 | Q_3 | Q_2 | Q_1 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 2 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 4 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 6 | 0 | 1 | 1 | 0 |
| 7 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| 15 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Если в качестве выходов счетчика использовать прямые выходы триггеров, а на синхровходы последующих триггеров подавать сигналы с инверсных выходов предыдущих триггеров, получим вычитающий счетчик. Перед началом счета должна быть предусмотрена установка всех его триггеров в исходное состояние "1". При счете импульсов вычитающий счетчик будет формировать на прямых выходах триггеров убывающие кодовые наборы от 1111 до 0000.

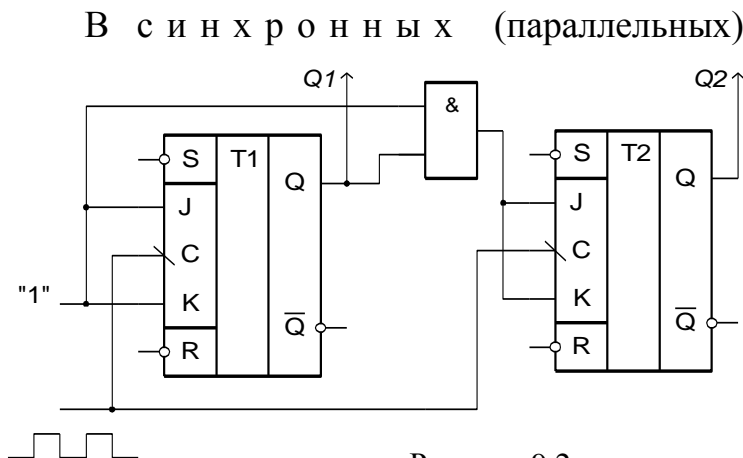


Рисунок 9.2
Синхронный счетчик

В синхронных (параллельных) счетчиках счетные импульсы поступают одновременно на входы синхронизации всех триггеров (рис.9.2). Значение Q_i изменится при поступлении очередного счетного импульса в том случае, если переменные во всех младших разрядах Q_{i-1}, \dots, Q_1 находятся в состоянии "1" (см. табл.9.1).

Счетчики

Счетчики изготавливаются в виде готовых микросхем. Например, микросхема К155ИЕ2 - это двоично-десятичный счетчик, микросхема К155ИЕ4 имеет модуль счета 13, а К155ИЕ6 - реверсивный счетчик с предустановкой.

В тех случаях, когда требуется счетчик с модулем счета, меньшим, чем 2^n состояний, избыточные состояния исключаются с помощью комбинационной

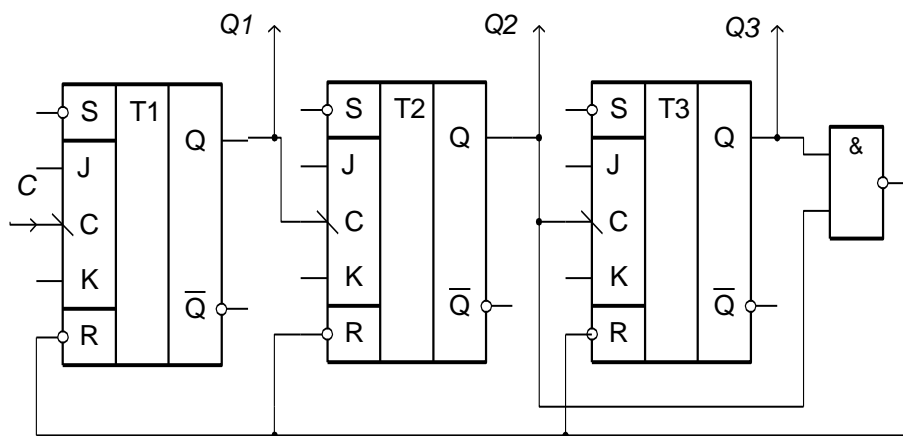


Рисунок 9.3
Счетчик на шесть состояний

схемы. На рис.9.3 показана схема суммирующего счетчика с $K = 6$. После шестого импульса сигналы с выходов $Q_2 = 1$ и $Q_3 = 1$ вызовут появления «0» на выходе элемента 2И-НЕ, что в свою очередь приведет к обнулению всех триггеров.

Логический элемент 2И-НЕ в данном случае играет роль комбинационной схемы, выявляющей значение выходного кода, при котором счетчик должен устанавливаться в начальное состояние.

Микросхема К155ИЕ7 представляет собой двоичный четырехразрядный реверсивный счетчик широкого применения. Его основу составляют четыре JK-триггера, а вспомогательные операции выполняются 18 логическими

элементами. Счетчик имеет управляющий вход V , два счетных входа (прямого счета $C1$ и обратного счета $C2$), четыре информационных входа предустановки $D3, D2, D1, D0$, соответствующие выходы $Q3, Q2, Q1, Q0$, а также два инверсных выхода переноса B и P . Условное обозначение приведено на рис. 9.4.

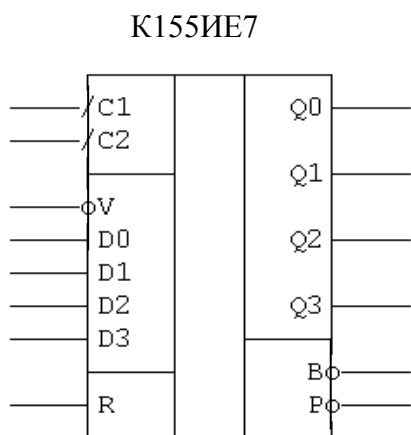


Рисунок 9.4
Четырех разрядный
реверсивный счетчик

В зависимости от состояний входов возможны три режима работы счетчика:

- режим счета реализуется, когда $V = 1$: при подаче счетных импульсов на вход $C1$ происходит увеличение двоичного выходного кода, при подаче импульсов на вход $C2$ — уменьшение;

- режим параллельной записи обеспечивается, когда $V = 0$, при этом кодовые наборы, установленные на информационных входах, повторяются на выходах соответствующих разрядов, независимо от состояния счетных входов;

- сброс счетчика осуществляется подачей высокого уровня напряжения на вход R , что приведет к отключению всех других входов и запрещению записи.

Регистры широко используются для передачи, хранения и преобразования двоичных кодов. В зависимости от функционального назначения различают регистры сдвига (последовательные) и регистры памяти (параллельные).

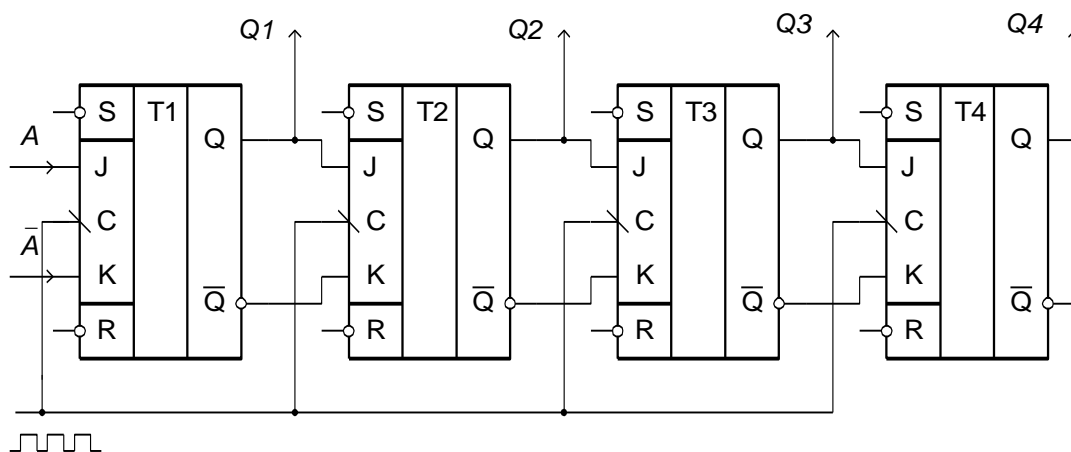


Рисунок 9.5
Регистр сдвига

В четырехразрядном регистре сдвига, выполненном на JK-триггерах (рис.9.5), с приходом каждого тактового импульса на входы C происходит последовательная запись сигналов с прямых и инверсных выходов

на информационные входы каждого последующего триггера, от младшего разряда к старшему.

Если на информационных входах триггера $T1$ $J = 0$, $K = 1$, то в исходном состоянии на выходах $Q1=0, \bar{Q}2=1$. Эти же уровни сигналов последовательно передаются каждому триггеру после прихода тактовых импульсов, но не изменяют их состояния. Если же на входе первого триггера $J = 1$, $K = 0$, то после первого тактового импульса на его выходах установятся новые логические уровни, $Q1=1, \bar{Q}1=0$; вторым тактовым импульсом переключится второй триггер и т.д. (рис.9.6). Очевидно, что четвертый тактовый импульс сдвинет уровень логической 1 в четвертый триггер, и на выходах регистра появится кодовый набор 1111. В этом случае можно считать, что регистр работает в режиме преобразователя, с последовательным вводом и параллельным выводом информации объемом 4 бита.

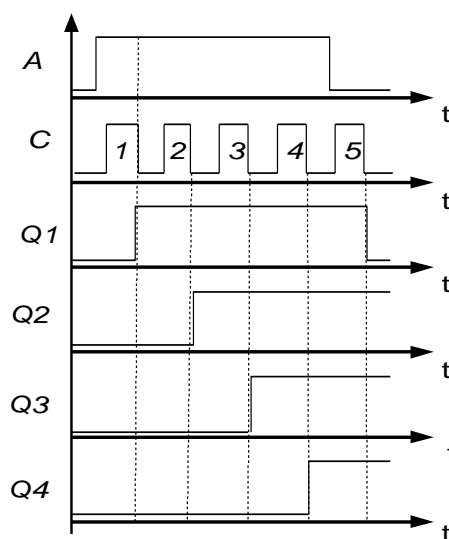


Рис.9.6

М и к р о с х е м а K155ИР1 (рис.9.7) является универсальным

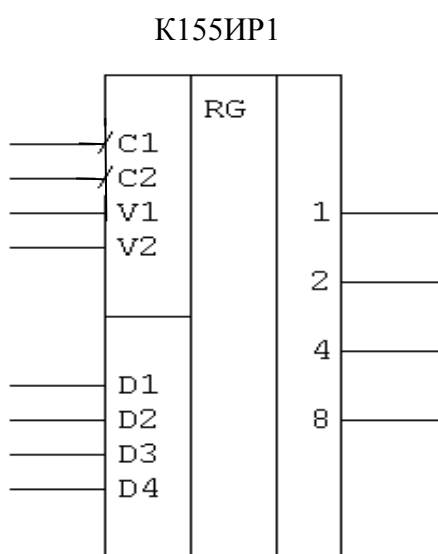


Рисунок 9.7
Регистр сдвига

четырёхразрядным регистром сдвига. Основу этой ИС составляют четыре триггера и одиннадцать логических элементов. Регистр имеет тактовый вход сдвига $C1$ и информационный вход $V1$ для записи последовательных сигналов, четыре информационных входа $D1$, $D2$, $D3$, $D4$ параллельной записи, тактовый вход $C2$ ввода этой информации, а также вход $V2$ выбора режима работы и выходы 1-2-4-8 всех четырех разрядов. Два основных режима работы “Сдвиг” и “Запись” выбираются по уровню сигнала на входе $V2$.

Если на вход $V2$ подается логический 0, то регистр работает в режиме сдвига информации от младшего разряда к старшему. Любой последовательный кодовый набор на входе $V1$ перемещается на выходы 1-2-4-8 отрицательными перепадами четырех тактовых импульсов по входу $C1$.

Если на вход $V2$ подается сигнал 1, то обеспечивается режим параллельной записи в регистр любого кодового набора со входов $D1$, $D2$, $D3$, $D4$ по срезу тактового импульса на входе $C2$.

Регистры памяти обычно выполняются на двухступенчатых *D*-триггерах и предназначены для приема, хранения и передачи двоичной информации в виде параллельного кода. Входная информация одновременно подается на входы регистра и при поступлении синхронизирующего импульса записывается и хранится в разрядах регистра.

Микросхема К155ТМ5 (рис.9.8) представляет собой четырехразрядный регистр памяти. В одном корпусе этой ИС находится четыре независимых *D*-триггера, с информационными входами *D4...D1* и прямыми выходами *Q4...Q1*. Управление работой ИС осуществляется по объединенным попарно входам синхронизации *G1-G2* и *G3-G4*.

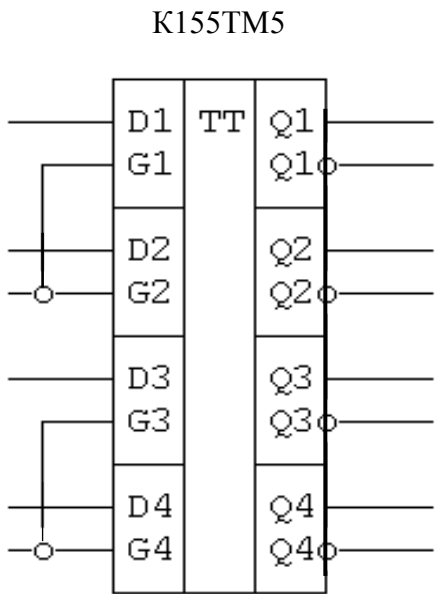


Рисунок 9.8
Регистр памяти

Использование двухступенчатых триггеров задержки обуславливает различные режимы работы данной схемы: запись в первую ступень и хранение информации производится непрерывно, однако передача сигнала во вторую ступень на выходы запрещается уровнем логического нуля на входах синхронизации. Если же на входы синхронизации поступают короткие стробирующие импульсы, то текущее значение входного сигнала передается во вторую ступень и сохраняется на выходах до прихода следующего импульса (режим ступенчатой передачи). При

уровне логической 1 на входах синхронизации осуществляется сквозная передача информации по всем четырем каналам.

Предварительное задание к эксперименту

1. Составить схему последовательного суммирующего счетчика на основе *JK*-триггеров с модулем счета, заданным в табл. 9.2. Для исключения избыточных состояний использовать комбинационные схемы на логических элементах 2И-НЕ и 3И-НЕ.

ТАБЛИЦА 9.2

| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--------------|---|---|---|---|----|----|----|----|
| Модуль счета | 3 | 5 | 7 | 9 | 10 | 11 | 12 | 14 |

2. Составить таблицу переключений счетчика.

Порядок выполнения эксперимента

1 Ознакомиться с лабораторным стендом: найти на стенде источники логических сигналов(0 и 1) и импульсов (0-1, 1-0) индикаторы состояния выходов триггеров. Для получения параллельного четырехразрядного

двоичного кода можно воспользоваться наборным полем на стенде «Логические элементы и комбинационные схемы»

2 Собрать схему четырехразрядного последовательного суммирующего счетчика на JK -триггерах ИС К155ТВ1 (рис.9.1, а). Для индикации состояний триггеров выходы Q_4, Q_3, Q_2, Q_1 подключить к светодиодам. Установить счетчик в исходное состояние $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = 0$, подав с наборного поля на \overline{R} -входы сигнал нуля. От источника импульсов подать на вход счетчика 15 импульсов и составить таблицу переключений.

3 Собрать схему вычитающего счетчика, подключив прямые выходы триггеров к индикаторам, а инверсные выходы триггеров младших разрядов – на синхровходы триггеров последующих старших разрядов. Предусмотреть установку всех триггеров счетчика в исходное состояние $Q_1=Q_2=Q_3=Q_4=1$. Проверить работу схемы, составить таблицу переключений вычитающего счетчика.

4. Собрать схему счетчика с заданным в предварительном задании модулем счета. Проверить работоспособность схемы и соответствие таблицы переключений.

5. Собрать схему двухразрядного параллельного счетчика на триггерах К155ТВ1 и ЛЭ К155ЛА4 (рис. 9.2). Проверить его работу.

6. Собрать схему четырехразрядного регистра сдвига на триггерах К155ТВ1 (рис.9.5). Подать на J -вход прямой, на K -вход инверсный логические сигналы. На синхровходы C подать сигналы от источника импульсов. Исследовать работу регистра. Начертить временную диаграмму.

7. Проверить работу счетчика К155ИЕ7. В режиме счета на суммирование или вычитание импульсы подавать на соответствующий вход счетчика от источника импульсов. В режиме предустановки параллельный код на информационные входы D_3, D_2, D_1, D_0 подать с наборного поля лабораторного стенда «Логические элементы и комбинационные схемы».

8. Ознакомиться с работой регистра памяти К155ТМ5. С шин наборного поля подать информацию (любое число в двоичном коде) на информационные входы D , а на разрешающие входы $C1-C2$ и $C3-C4$ подать «1». На выходы регистра подключить светодиоды. Изменяя информацию на D -входах, убедиться, что эта информация передается на выходы регистра. Поочередно подавая «0» на входы $C1-C2$ и $C3-C4$ определить, как будет работать регистр при изменении информации на D -входах.

9. Ознакомиться с работой регистра сдвига К155ИР1. В режиме параллельной записи ($V2 = 1$) подать с наборного поля на параллельные входы двоичный код 1010. Убедиться, что по срезу тактового импульса на входе $C2$ информация с параллельных входов запишется в регистр и появится на его выходах.

10. Установить режим последовательного сдвига информации в регистре К155ИР1 ($V2 = 0$). На последовательный вход $V1$ подать «1», на вход $C1$ подать нужное количество импульсов, чтобы в регистре записался код «1111». На вход $V1$ подать «0», и подать один импульс на вход $C1$. На выходе регистра должен

появиться код «1110». Подать «1» на вход *VI* и три импульса на вход *CI*. Записать какой код появится на выходе регистра?

Содержание отчета

Цель работы; схема счетчика с заданным табл.9.1 модулем счета и таблица переключений его триггеров; схема четырехразрядного последовательного суммирующего счетчика на JK-триггерах (рис.9.1, а) и таблица его переключений; схема двухразрядного параллельного счетчика (рис.9.2); схема четырехразрядного регистра сдвига (рис.9.5) и временные диаграммы его работы; временные диаграммы работы регистра памяти K155TM5 и регистра сдвига K155IP1 в режиме последовательно-параллельного преобразователя.

Контрольные вопросы

1. Какие типы счетчиков Вы знаете? 2. Поясните работу суммирующего и вычитающего счетчиков. 3. Что такое реверсивный счетчик? 4. Как строятся параллельные счетчики? 5. Приведите примеры использования двоичных и декадных счетчиков. 6. Объясните принцип действия регистра памяти. 7. Какие способы используются для увеличения числа разрядов счетчиков и регистров?

Лабораторная работа №10

ИССЛЕДОВАНИЕ НА ПЭВМ КАСКАДА УСИЛЕНИЯ НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ ПО СХЕМЕ ОЭ

Ц е л ь р а б о т ы : изучить принцип работы усилительного каскада с ОЭ и исследовать влияние элементов схемы на параметры и характеристики усилителя.

Общие сведения

Каскад усиления переменного тока по схеме ОЭ построен на биполярном транзисторе *n-p-n* (рис.10.1). Расчет каскада сводится к выбору точки покоя на статической линии нагрузки, определению величин R_K и R_B по заданным параметрам нагрузки, например, $U_{\text{вых.т}}$ и R_H , и напряжению источника питания E_K .

Выбранная точка покоя должна обеспечить требуемую величину тока в нагрузке, напряжения на нагрузке без нелинейных искажений и удовлетворять предельным параметрам транзистора. Поэтому ток покоя:

$$I_{\text{кп}} \geq I_{\text{нт}} = U_{\text{вых.т}} / R_H.$$

Напряжение покоя обычно выбирается $U_{\text{кэп}} = E_K/2$, чтобы обеспечить максимальное выходное напряжение без искажений.

Уравнение статической линии нагрузки

$$I_K = \frac{E_K - U_{\text{кэ}}}{R_K}.$$

Линию нагрузки можно построить в координатах I_K , $U_{\text{кэ}}$ по двум точкам. Одна из них - точка покоя **П**, координаты которой определены. Вторая может быть получена согласно уравнению - если принять $I_K=0$, то $U_{\text{кэ}} = E_K$. Построение статической линии нагрузки показано на рис. 10.2 (линия *ав*).

Чтобы обеспечить заданный режим покоя, надо рассчитать величины R_K и R_B :

$$R_K = \frac{E_K - U_{\text{кэп}}}{I_{\text{кп}}};$$

$$R_B = \frac{E_K - U_{\text{бэп}}}{I_{\text{бп}}}; \quad I_{\text{бп}} = I_{\text{кп}}/h_{21}.$$

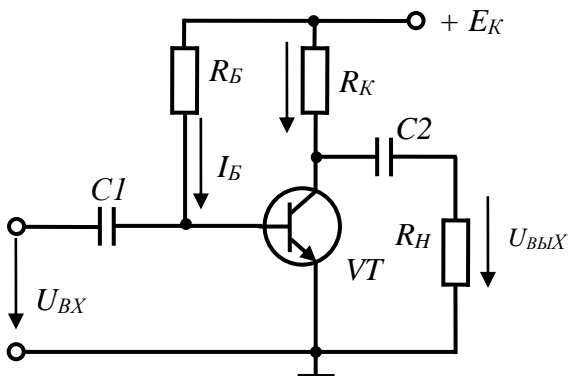


Рисунок 10.1
Усилительный каскад

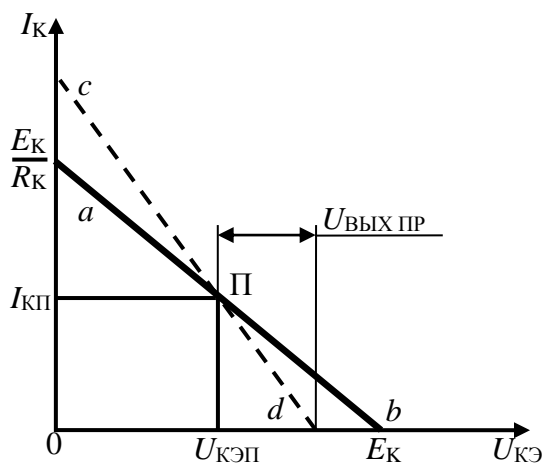


Рисунок 10.2.
Линия нагрузки каскада

При работе каскада в режиме холостого хода и $i_{\text{вх}} = I_{\text{вх.м}} \sin \omega t$ рабочая точка перемещается по статической линии нагрузки в обе стороны от точки покоя. Амплитуда переменной составляющей напряжения коллектор-эмиттер или равного ей выходного напряжения не может быть больше $E_{\text{к}}/2$.

При работе каскада на нагрузку в коллекторную цепь параллельно $R_{\text{к}}$ включается $R_{\text{н}}$. Поэтому режим работы каскада меняется. Рабочая точка перемещается по динамической линии нагрузки, уравнение которой

$$\Delta u_{\text{кэ}} = \Delta i_{\text{кэ}} \frac{R_{\text{к}} R_{\text{н}}}{R_{\text{к}} + R_{\text{н}}};$$

Динамическая линия нагрузки должна проходить через точку покоя **П** (частный случай - $\Delta i_{\text{кэ}}=0$). Вторую точку можно получить, задавшись приращением $\Delta i_{\text{к}}$ и подсчитав изменение напряжения $\Delta U_{\text{кэ}}$ относительно координат точки покоя. Динамическая линия нагрузки показана на рис.10.2 (с-д). Очевидно, что угол между осью $U_{\text{кэ}}$ и динамической линией нагрузки тем больше, чем меньше $R_{\text{н}}$ (при $R_{\text{н}} = 0$ он составит 90°). В связи с этим предельная амплитуда выходного напряжения $U_{\text{вых пр}}$ с уменьшением $R_{\text{н}}$ становится меньше $E_{\text{к}}/2$. Это может вызвать появление нелинейных искажений. Если заданное значение $U_{\text{вых.м}}$, больше, чем $U_{\text{вых пр}}$, чтобы избежать нелинейных искажений, надо сместить точку покоя. Увеличивают $I_{\text{кп}}$ и анализ повторяют.

Динамические параметры каскада:

$$k_u = \frac{h_{21}}{h_{11}} \frac{R_{\text{к}} R_{\text{н}}}{(R_{\text{к}} + R_{\text{н}})};$$

$$k_i = h_{21} \frac{R_{\text{к}}}{R_{\text{к}} + R_{\text{н}}};$$

$$k_p = k_u k_i.$$

Предварительное задание к эксперименту

Транзистор каскада имеет следующие параметры:

$h_{11} = 0,5 \text{ кОм}$; $h_{21} = 25$; $h_{22} = 0,3 \text{ мкСм}$; $h_{12} = 0$.

Напряжение база-эмиттер $U_{\text{БЭ}}$ принять равным во всех режимах $0,6 \text{ В}$. Напряжением $U_{\text{кэ}}$ в режиме насыщения пренебречь. Напряжение источника питания $E_{\text{к}} = 12 \text{ В}$.

1. Рассчитать величину $R_{\text{к}}$, которая обеспечит на холостом ходу ($R_{\text{н}}=\infty$) заданный в таб.10.1. коэффициент усиления. Начертить в координатах $I_{\text{к}}$, $U_{\text{кэ}}$ линию нагрузки. Рассчитать сопротивление $R_{\text{б}}$, которое позволит получить максимальную амплитуду выходного напряжения $U_{\text{вых.м}}$, без искажений. Показать положение точки покоя на линии нагрузки и определить предельную величину $U_{\text{вых пр}}$.

2. Определить амплитуду входного напряжения $U_{\text{вх.м}}$, соответствующего определенному в п.1 значению $U_{\text{вых пр}}$.

3. Рассчитать при заданном в табл. 10.1 сопротивлении нагрузки $R_{\text{н}}$ значения коэффициентов усиления k_u , k_p , k_i . Построить динамическую линию

нагрузки и определить предельную величину $U_{\text{вых.т}}$, сравнить с предыдущими результатами.

4. Рассчитать амплитуду входного напряжения $U_{\text{вх.т}}$, позволяющего получить максимальное выходное напряжение без искажений.

5. Определить $R_{\text{н}}$, при котором k_p достигает максимального значения. Рассчитать это значение k_p .

ТАБЛИЦА 10.1

| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----------------------|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| k_u | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 | 65 | 70 |
| $R_{\text{н}}$, кОм | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,02 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 4,0 |

Порядок выполнения эксперимента

Математическая модель каскада усиления реализована в программе LAB_UK.EXE. При запуске она иллюстрирует работу каскада при выбранных в качестве примера значениях $R_{\text{к}}$, $R_{\text{б}}$, $R_{\text{н}}$ и $U_{\text{вх.т}}$, которые высвечиваются на экране монитора. На экран выводятся линии нагрузки с указанием положения точки покоя, осциллограммы входного и выходного напряжений, значения коэффициентов усиления и параметры точки покоя. После нажатия клавиши “Ввод” изображается амплитудная характеристика каскада, и программа переходит в диалоговый режим.

Ввод новых значений $R_{\text{к}}$, $R_{\text{б}}$, $R_{\text{н}}$ и $U_{\text{вх.т}}$ производится в рамку, которая высвечивается у соответствующей величины. Перемещение рамки с помощью клавиш “Вверх”, “Вниз”. После ввода данных нажать клавишу “Ввод”.

1. Ввести рассчитанные значения $R_{\text{к}}$, $R_{\text{б}}$ и $R_{\text{н}}=1000$ кОм для режима холостого хода. Записать значение k_u , параметры режима покоя и начертить с экрана в масштабе амплитудную характеристику каскада. По характеристике определить $U_{\text{вых пр}}$ и сравнить с результатом расчета предварительного задания.

2. Увеличить в 2 раза $R_{\text{к}}$. Записать значение k_u и нанести на предыдущий график амплитудную характеристику каскада в этом режиме. Объяснить изменения k_u .

3. Ввести рассчитанное значение $R_{\text{к}}$ при заданном $R_{\text{н}}$. Записать значения k_u , k_p , k_i и сравнить с расчетными. На предыдущем графике нанести амплитудную характеристику. Определить $U_{\text{вых пр}}$. Сравнить с расчетным.

4. Ввести рассчитанную в п.4 предварительного задания величину $U_{\text{вх.т}}$ и проверить отсутствие искажений. Перечертить с экрана осциллограммы входного и выходного напряжений.

5. Увеличить $U_{\text{вх.т}}$ в два раза, обратить внимание на появление нелинейных искажений. Перечертить осциллограммы входного и выходного напряжений.

6. Изучить влияние $R_{\text{б}}$ на форму $U_{\text{вых}}$, для чего ввести при первоначальном значении $U_{\text{вх.т}}$ значения $R_{\text{б}}$, равные 0,6 и 2,0 от расчетного. Перечертить осциллограммы входного и выходного напряжений. Объяснить причины появления нелинейных искажений.

Содержание отчета

Цель работы: схема исследуемого каскада; расчет предварительного задания; значения коэффициентов усиления, амплитудные характеристики и осциллограммы по каждому пункту выполненного эксперимента; краткие выводы.

Контрольные вопросы

1. Объяснить принцип работ каскада усиления, назначение основных элементов схемы. 2. Какими параметрами характеризуется усилитель? 3. Какое влияние на параметры каскада оказывает R_k ? 4. Что такое нелинейные искажения и причина их появления? 5. Можно ли получить неискаженный выходной сигнал, если заданное $U_{\text{вых.т}} > E_k/2$? 6. Какое влияние оказывает R_b на положение точки покоя? 7. Всегда ли нужно выбирать $U_{k\text{эп}} \approx E_k/2$?

Лабораторная работа № 11

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Цель работы: Ознакомление с работой схем выпрямления трехфазного тока; экспериментальная проверка основных соотношений между токами и напряжениями в схемах; ознакомление с формой кривых тока и напряжения в различных цепях и с ходом внешних характеристик обеих схем выпрямления.

Общие сведения

Трехфазная схема выпрямления с нулевым выводом. Трехфазная схема выпрямления с нулевым выводом (рис. 11.1, *а*) содержит трехфазный трансформатор и три вентиля ($VD1$, $VD2$, $VD3$). Первичная обмотка трансформатора, в зависимости от величины питающего напряжения, может быть соединена в звезду или в треугольник, вторичная - только в звезду. Нагрузка включается между нулевой точкой вторичной обмотки трансформатора и общей точкой катодов вентилях.

Схема выпрямления является однополупериодной.

Рассмотрим работу идеальной схемы (рис. 11.1, *а*) на активную нагрузку. В любой момент времени ток протекает только в той фазе, в которой на аноде вентиля имеется наибольший положительный потенциал (рис. 11.1, *б*).

Если предположить, что индуктивное сопротивление рассеяния обмоток трансформатора X_T равно нулю, и переход тока от одного вентиля к другому – коммутация – происходит мгновенно, то чередование работы вентилях происходит в момент пересечения положительных полуволн фазных ЭДС, в так называемых точках естественного зажигания. На отрезке $t_1 - t_2$ работает вентиль фазы *a*, на отрезке $t_2 - t_3$ вентиль фазы *b*, и т.д. Выпрямленный ток, проходящий через нагрузку, складывается из чередующихся анодных токов i_{a1} , i_{a2} , i_{a3} , длительность протекания которых составляет одну треть периода (рис. 11.1, *в*), $I_a = I_H/3$.

Форма напряжения u_H на нагрузке представляет собой огибающую фазных напряжений вторичной обмотки трансформатора. Как известно, среднее значение выпрямленного напряжения определяется по формуле:

$$U_{H\text{ ср}} = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{m}}^{+\frac{\pi}{m}} \sqrt{2} \cdot U_2 \cdot \cos \omega t \, d\omega t.$$

Для схемы с нулевым выводом ($m = 3$) напряжение холостого хода $U_{H\text{ ср}} = 1,17U_2$. Пульсация выпрямленного напряжения частотой 150 Гц достигает значительной величины $q = 0,25$.

В непроводящую часть периода к каждому вентилю прикладывается разность двух фазных напряжений (собственной фазы и смежной работающей фазы, как это видно из заштрихованной области на рис. 11.1, *б*). Максимальное

обратное напряжение достигает амплитуды линейного напряжения вторичной обмотки трансформатора:

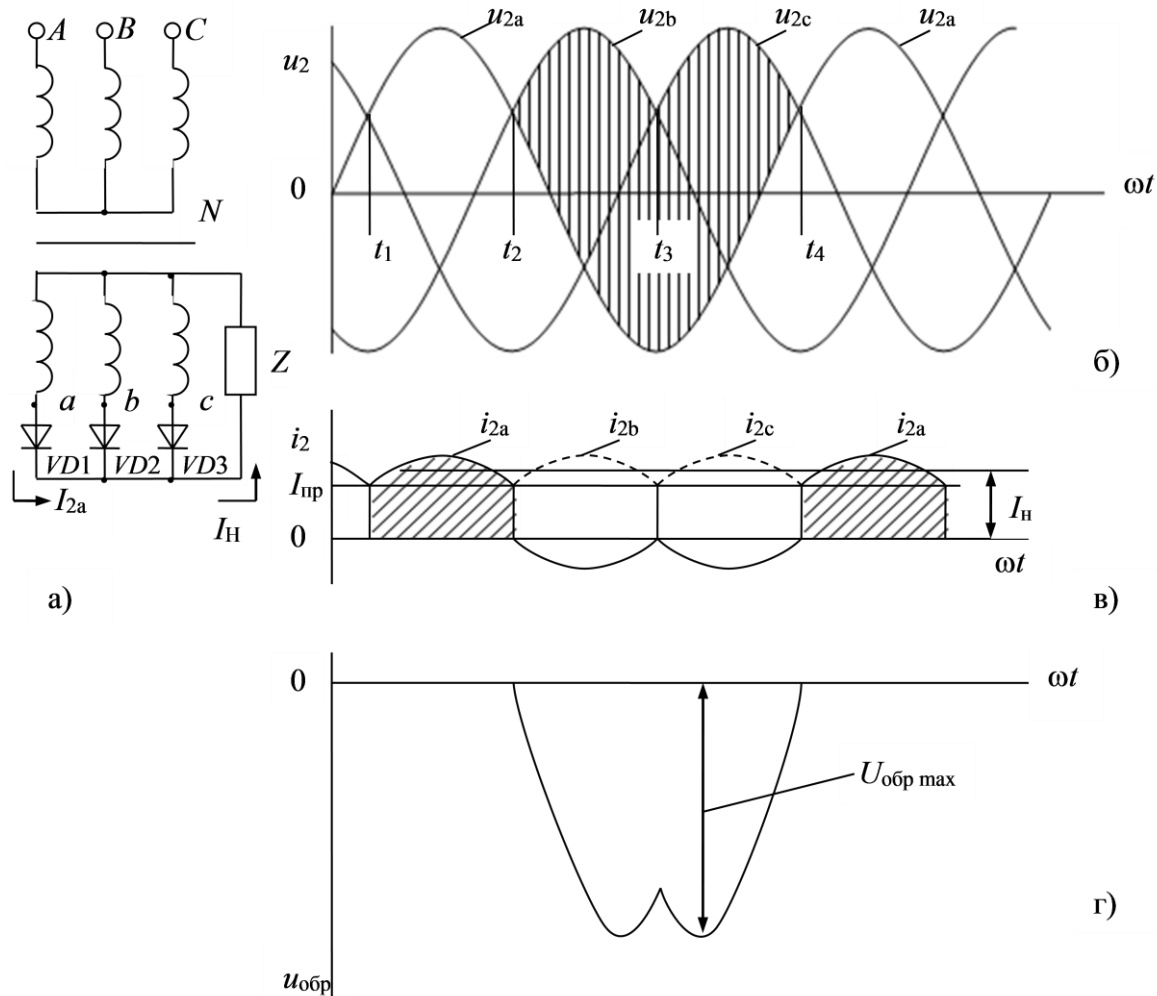


Рисунок 11.1 Трехфазный выпрямитель с нулевым выводом

$$U_{обр \max} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_2 = 2,09 \cdot U_{н \text{ ср}}.$$

Большим недостатком схемы с нулевым выводом является наличие потока вынужденного намагничивания трансформатора как результат протекания во вторичных обмотках токов одного направления. Эти потоки замыкаются через кожух и воздух. Они вызывают нагрев кожуха и увеличивают потери в трансформаторе. Во избежание насыщения и связанного с этим увеличения намагничивающего тока первичной обмотки трансформатора приходится увеличивать сечение сердечника или применять схему соединения обмоток «зигзаг».

Из-за большого спектра гармоник расчетная мощность трансформатора значительно превышает мощность нагрузки, $S_T = 1,34 P_n$.

На работу реальных схем выпрямления оказывают существенное влияние индуктивности рассеяния обмоток трансформатора и характер нагрузки.

Как видно из диаграммы рис. 11.2, б, в момент времени t_1 ток фазы a не может мгновенно снизиться до нуля, а ток фазы b не может возрасти скачком до максимума, так как ЭДС самоиндукции, наводимая в индуктивности рассеяния трансформатора, препятствует быстрому изменению тока. Поэтому в течение времени коммутации γ обе смежные фазы работают параллельно. ЭДС самоиндукции, наводимая в индуктивности рассеяния обмоток, складывается с напряжением фазы a и вычитается из напряжения фазы b . Результирующие напряжения параллельно работающих фаз уравниваются, а их величина определяется полусуммой фазных напряжений. В этом случае мгновенные значения выпрямленного напряжения (на нагрузке) уменьшаются относительно огибающей трехфазной системы напряжений на величину ординат заштрихованных участков (рис. 11.2, а).

Уменьшение напряжения на нагрузке, вызванное влиянием реактивного сопротивления обмоток трансформатора, увеличивается с ростом тока I_H , сопротивления X_T и числа фаз выпрямителя m :

$$\Delta U_k = \frac{X_T I_H}{2\pi / m}.$$

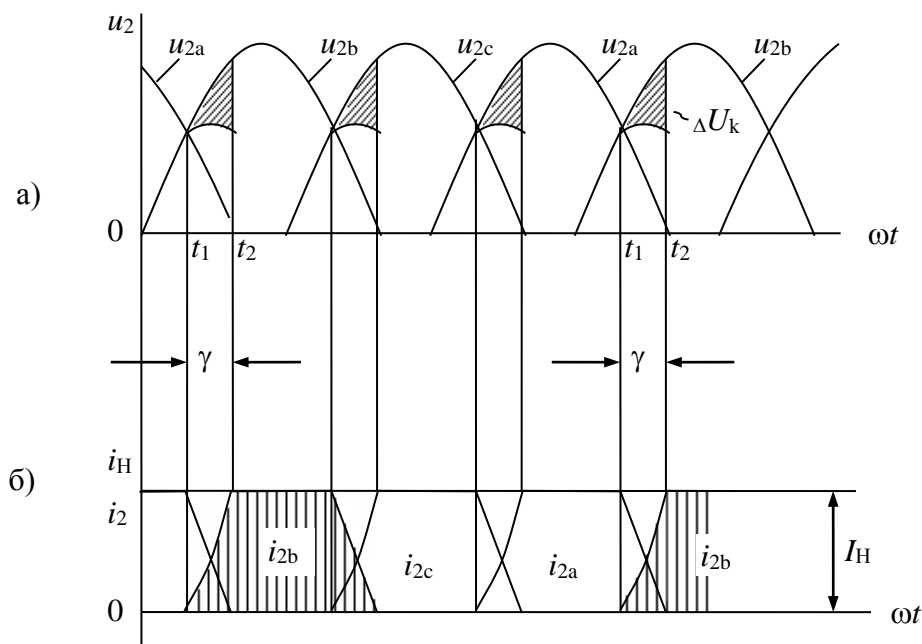


Рисунок 11.2 Влияние индуктивности

При работе выпрямителя на активно-индуктивную нагрузку, в отличие от активной, значительно сглаживаются пульсации выпрямленного тока I_H . В пределе при неограниченном увеличении индуктивности нагрузки ($X_H \rightarrow \infty$) ток нагрузки спрямляется, а форма тока в фазах приближается к прямоугольной.

Мостовая схема выпрямления трехфазного тока. Мостовая схема выпрямления трехфазного тока (схема Ларионова) имеет две группы вентилей, катодную ($VD1, VD3, VD5$) и анодную ($VD2, VD4, VD6$). Общая точка катодной

группы вентиля является положительным полюсом, анодной группы - отрицательным полюсом. В отличие от предыдущей, мостовая схема является двухполупериодной.

В любой момент времени в этой схеме работают два вентиля: один - из катодной, другой - из анодной группы. В идеальной схеме, работающей на активную нагрузку (рис. 11.3, а), открытие вентиля катодной группы происходит в момент пересечения, соответствующих положительных и отрицательных участков синусоид фазных ЭДС. Последовательность работы отдельных вентилях в течение периода переменного напряжения можно проследить по диаграммам фазных ЭДС (рис. 11.3, б). Так, на участке $t_1 - t_2$ работает вентиль $VD1$ из катодной и $VD4$ из анодной группы.

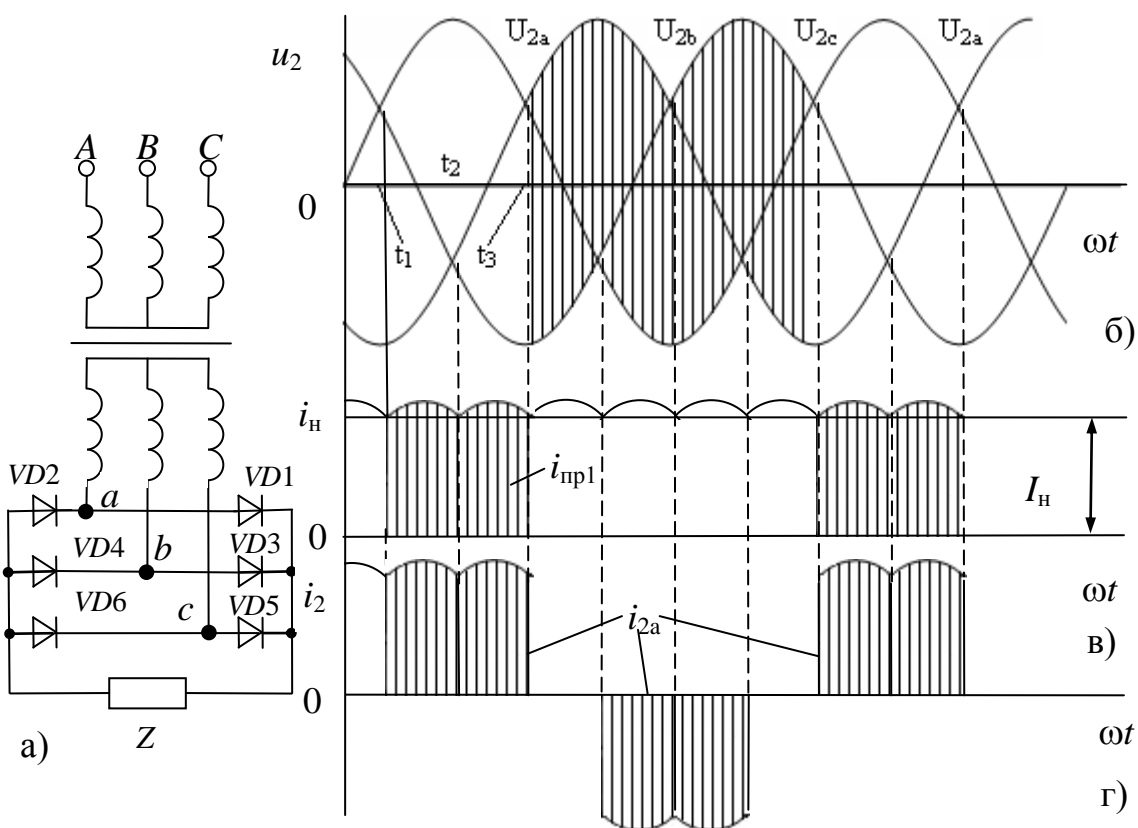


Рисунок 11.3 Трехфазный мостовой выпрямитель

С момента t_2 вместо вентиля $VD4$ вступает в работу вентиль $VD6$, в то время как $VD1$ продолжает работать еще в течение одной шестой периода, т.е. от t_2 до t_3 . Затем, на смену $VD1$ приходит вентиль $VD3$ и т.д. Таким образом, каждый вентиль работает одну треть периода, $I_a = I_H/3$.

Форма тока вентиля показана на рис. 11.3, в, г. Форма тока в нагрузке I_H изображена на рис. 11.3, в. Ток i_2 вторичной обмотки трансформатора протекает дважды за период в противоположных направлениях (рис. 11.3, г).

Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения (рис. 11.3, в) составляет $q = 0,057$, а частота пульсаций - 300 Гц, т.е. в два раза выше, чем в однополупериодной схеме. Поэтому мостовая схема выпрямления трехфазного тока эквивалентна шестифазной схеме выпрямления с нулевым выводом.

Среднее значение выпрямленного напряжения в мостовой схеме ($m = 6$) на холостом ходу

$$U_{н\text{ ср}} = 2,34 \cdot U_2.$$

Обратное напряжение на неработающих вентилях в каждый момент времени определяется геометрической разностью фазных ЭДС, а его максимум равен амплитуде линейного напряжения,

$$U_{обр\text{ max}} = \sqrt{2}\sqrt{3} \cdot U_2 = 1,045 \cdot U_{н\text{ ср}}.$$

Мостовая схема выгодно отличается от схемы с нулевым выводом благодаря хорошему использованию трансформатора ($S_T = 1,045 \cdot P_H$), малому значению максимального обратного напряжения на вентилях $U_{обр\text{ max}} = 1,045 \cdot U_{н\text{ ср}}$ и небольшой пульсации выпрямленного напряжения.

Внешняя характеристика выпрямителя. Внешняя (нагрузочная) характеристика $U_{н\text{ ср}} = f(I_H)$ является основной электрической характеристикой выпрямителя.

При небольшой мощности выпрямителя коммутационные процессы, вызванные индуктивным сопротивлением рассеяния трансформатора, можно не учитывать. Приблизительный расчет выходного напряжения выпрямителя с учетом внутреннего падения напряжения на вторичной обмотке трансформатора, вентилях и элементах фильтра может быть выполнен по формуле:

$$U_{н\text{ ср}} = U_{н\text{ ср}}^{XX} - (R_T + R_{пр} + R_{\phi})I_H = U_{н\text{ ср}}^{XX} - R_{вых}I_H,$$

где $U_{н\text{ ср}}^{XX}$ – выходное напряжение выпрямителя в режиме холостого хода;

R_T – сопротивление вторичной обмотки трансформатора;

$R_{пр}$ – суммарное сопротивление открытых вентиляей;

R_{ϕ} – суммарное сопротивление фильтра.

Предварительное задание к эксперименту

Для указанного в таблице 11.1 типа выпрямителя по заданным току I_H и сопротивлению R_H нагрузки рассчитать напряжения $U_{н\text{ ср}}$, U_2 , коэффициент трансформации n , амплитуду обратного напряжения $U_{обр\text{ max}}$ и прямой ток $I_{пр\text{ ср}}$ вентиляей. Напряжение питающей сети $U_1 = 220$ В, частота $f = 50$ Гц.

ТАБЛИЦА 11.1

| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Тип выпрямителя | Рис. 11.1 | Рис. 11.3 | Рис. 11.1 | Рис. 11.3 | Рис. 11.1 | Рис. 11.3 | Рис. 11.1 | Рис. 11.3 |
| R_H , Ом | 20 | 25 | 30 | 20 | 25 | 32 | 40 | 35 |
| I_H , А | 0,6 | 1,2 | 1,1 | 0,5 | 0,8 | 1,7 | 0,8 | 1,0 |

Содержание работы

Исследование трехфазных схем выпрямления переменного тока (с нулевым выводом и мостовой) производится на лабораторном стенде. На нем установлены силовой трехфазный трансформатор, измерительные приборы, полупроводниковые диоды и регулируемая активно-индуктивная нагрузка. Напряжение на схему подается автоматическим выключателем. Потребляемая схемой мощность измеряется трехфазным ваттметром, включенным на стороне первичной обмотки трансформатора.

В лабораторной работе исследуются основные характеристики обеих схем выпрямления, производятся необходимые измерения, а также снимаются осциллограммы напряжения и тока в контрольных точках. В последнем случае сигнал на вход осциллографа снимается с шунтов, встроенных в штепсельные вилки.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с устройством стенда для исследования трехфазных схем выпрямления переменного тока (рис. 11.4).
2. Собрать схему с нулевым выводом (рис. 11.1, а) (установить на стенде электрические связи между контактными гнездами X14-X15 согласно рис. 11.4).

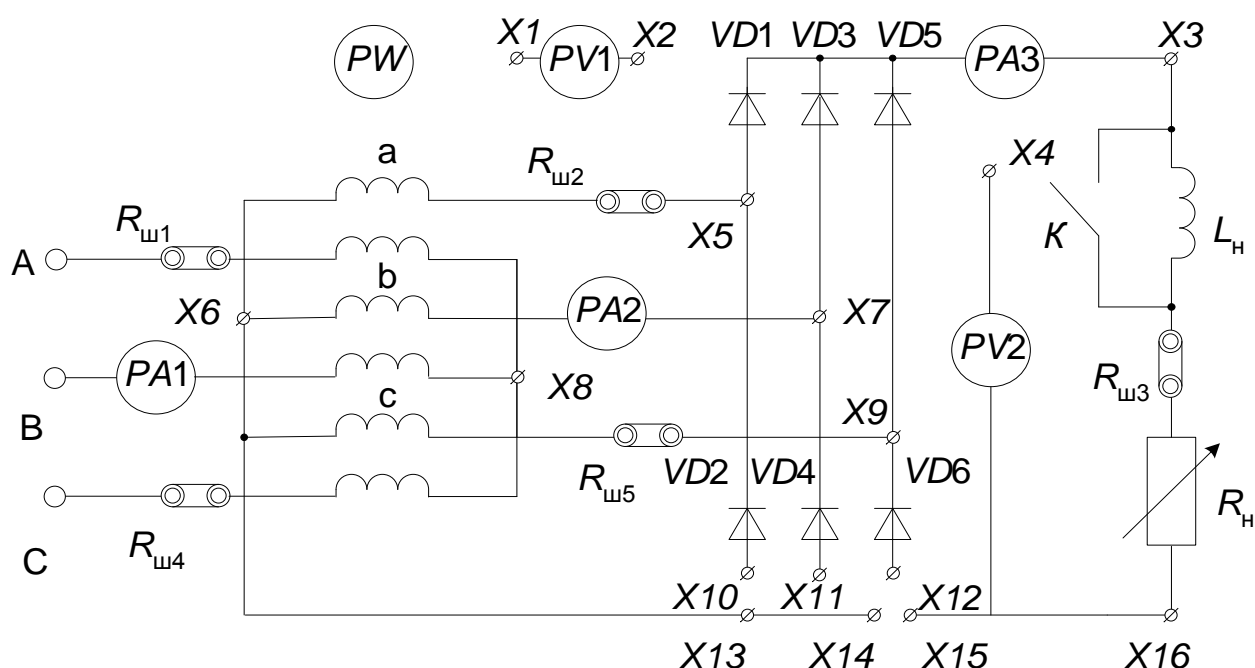


Рисунок 11.4 Схема экспериментальной установки

В соответствии с рис. 11.4 подключить к контактным гнездам X3, X16 осциллограф, подключить вольтметр PV1 (установить электрические связи между контактными гнездами X1-X5, X2-X7), подключить вольтметр PV2 (установить электрические связи между контактными гнездами X3-X4).

Повернуть рукоятку ступенчатого переключателя нагрузки R_H в крайнее левое положение (холостой ход). Включить рубильник на щите и автоматическим выключателем подать напряжение на схему.

3. Снять внешние (нагрузочные) характеристики выпрямителя при активной (ключ K замкнут) и активно-индуктивной нагрузке (ключ K разомкнут) (рис. 11.4). Показания измерительных приборов ($PV2$, $PA3$) записать в табл. 11.2.

ТАБЛИЦА 11.2

| Схемы выпрямления | | | | | | | |
|-------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|-------------------|
| Схема с нулевым выводом | | | | Мостовая схема | | | |
| Активная нагрузка | | Активно-индуктивная нагрузка | | Активная нагрузка | | Активно-индуктивная нагрузка | |
| I_H | $U_{H\text{ ср}}$ | I_H | $U_{H\text{ ср}}$ | I_H | $U_{H\text{ ср}}$ | I_H | $U_{H\text{ ср}}$ |
| 0 | | 0 | | 0 | | 0 | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

4. Записать показания измерительных приборов и проверить в схеме энергетические соотношения между напряжениями $\frac{U_2}{U_H}$ и токами $\frac{I_2}{I_H}$. Данные эксперимента сравнить с теоретическими значениями. Соотношения для напряжений определить при холостом ходе ($I_H = 0$), а соотношения для токов – при максимальном значении выпрямленного тока в активной и активно-индуктивной нагрузках.

Все расчетные соотношения записать в сводную табл. 11. 3.

ТАБЛИЦА 11.3

| Схемы выпрям ления | Характер нагрузки | I_2 , А | I_H , А | U_2 , В | $U_{H\text{ ср}}$, В | Соотношения | | | | λ |
|-------------------------------|---|--------------|--------------|--------------|--------------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------------------|-----------|
| | | | | | | Расчетные | | Теоретические | | |
| | | | | | | $\frac{I_2}{I_H}$ | $\frac{U_2}{U_{H\text{ ср}}}$ | $\frac{I_2}{I_H}$ | $\frac{U_2}{U_{H\text{ ср}}}$ | |
| Схема с нулевым выводом | Активная нагрузка $L_H=0$ | | | | | | | 0,587 | 0,855 | — |
| | Активно-индуктивная нагрузка $L_H=\infty$ | | | | | | | 0,577 | 0,855 | — |
| Мостовая схема | Активная нагрузка $L_H=0$ | | | | | | | 0,815 | 0,427 | |
| | Активно-индуктив-ная нагрузка $L_H=\infty$ | | | | | | | 0,815 | 0,427 | |

5. Установив переключатель "Ослабление" (на передней панели осциллографа) в положение "1:100", зарисовать формы кривых обратного напряжения на диодах, напряжения на активной и активно-индуктивной нагрузке при максимальном токе в ней. Все осциллограммы снимать при неизменном положении ручек потенциометров на передней панели осциллографа.

6. Переведя переключатель "Ослабление" в положение "1:1" и установив шунты, зарисовать форму кривых токов i_n, i_2, i_1 при максимальном значении тока в активной и активно-индуктивной нагрузке. Сигнал на вход осциллографа снимается с шунтов $R_{ш1}, R_{ш2}, R_{ш3}$, встроенных в штепсельные вилки (рис. 11.4).

После окончания опытов привести схему в исходное положение.

7. Собрать мостовую схему (рис. 11.3, а). В соответствии с рис. 11.4 на стенде установить электрические связи между контактными гнездами X10-X11-X12-X15, соединив их в одну точку специальным проводом - разветвителем на 4 входа.

Подключить согласно рис. 11.4 к контактным гнездам X3, X16 осциллограф, подключить вольтметр PV1 (установить электрические связи между контактными гнездами X1-X5, X2-X7), подключить вольтметр PV2 (установить электрические связи между контактными гнездами X3-X4).

Установить переключатель нагрузки R_n в положение «холостой ход». Автоматическим выключателем подать напряжение на схему.

8. Снять внешние характеристики выпрямителя при активной и активно-индуктивной нагрузке. Показания приборов записать в таблицу 11.2.

9. Определить в схеме соотношения напряжений $\frac{U_2}{U_{н\text{ ср}}}$ и токов $\frac{I_2}{I_n}$ и сравнить их с теоретическими значениями.

10. Определить при максимальном значении тока нагрузки коэффициент мощности выпрямителя $\lambda = \frac{P}{3U_1 I_1}$,

где P - показания ваттметра, Вт;

U_1 - фазное напряжение первичной обмотки трансформатора, В;

I_1 - ток фазы первичной обмотки трансформатора, А.

Результаты расчетов пунктов 10 и 11 записать в сводную табл. 11. 3.

11. По аналогии с пунктами 5 и 6 зарисовать форму кривых $u_{\text{обр max}}, u_n, i_n, i_2, i_1$.

12. После выполнения исследований мостовой схемы привести ее в исходное состояние.

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены:

Цель работы. Рабочие схемы выпрямления. Таблицы измерений и вычислений, осциллограммы. Внешние характеристики $U_{н\text{ ср}} = f(I_{н})$ для обеих схем.

Контрольные вопросы

1. Принцип работы трехфазной схемы выпрямления с выводом нулевой точки.
2. Принцип работы мостовой схемы выпрямления.
3. Как происходит коммутация тока в вентилях исследуемых реальных схем?
4. Чем объясняется плохое использование трансформатора по нагрузке в нулевой схеме?
5. Поясните вид кривых токов и напряжений $i_2, i_{н}, u_2, u_{н}$ в обеих схемах.
6. Перечислите достоинства мостовой схемы.

Лабораторная работа №12

УПРАВЛЯЕМЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Цель работы: изучить работу однофазного управляемого выпрямителя на активную и активно-индуктивную нагрузку; исследовать работу инвертора, ведомого сетью; снять основные характеристики управляемого выпрямителя и инвертора.

Общие сведения

Для плавного и бесконтактного регулирования напряжения в различных отраслях промышленности широко применяются управляемые выпрямители (УВ), в вентильном звене которых устанавливаются тиристоры вместо диодов. Регулирование тока и напряжения нагрузки в широком диапазоне осуществляется путем изменения момента включения тиристоров с помощью системы импульсно-фазового управления (СИФУ).

Дополнительным преимуществом управляемых выпрямителей является возможность работы в режиме инвертирования, т.е. преобразования постоянного тока в переменный. Установки, совмещающие оба режима работы, получили название управляемых преобразователей.

Управляемый выпрямитель

Рассмотрим работу однофазного двухполупериодного выпрямителя с нулевым выводом на активную нагрузку (рис. 12.1, а). Для простоты предположим, что тиристоры, подобно диодам, включаются в точках естественного открывания, в данном случае, после прохождения положительных полусинусоид вторичного напряжения U_2 через нуль.

По отношению к средней точке напряжения обеих вторичных полуобмоток сдвинуты по фазе на 180° (рис. 12.1, б). В первый полупериод, когда на аноде тиристора $VS1$ появляется положительный потенциал по отношению к катоду, в верхнем контуре протекает ток от полуобмотки

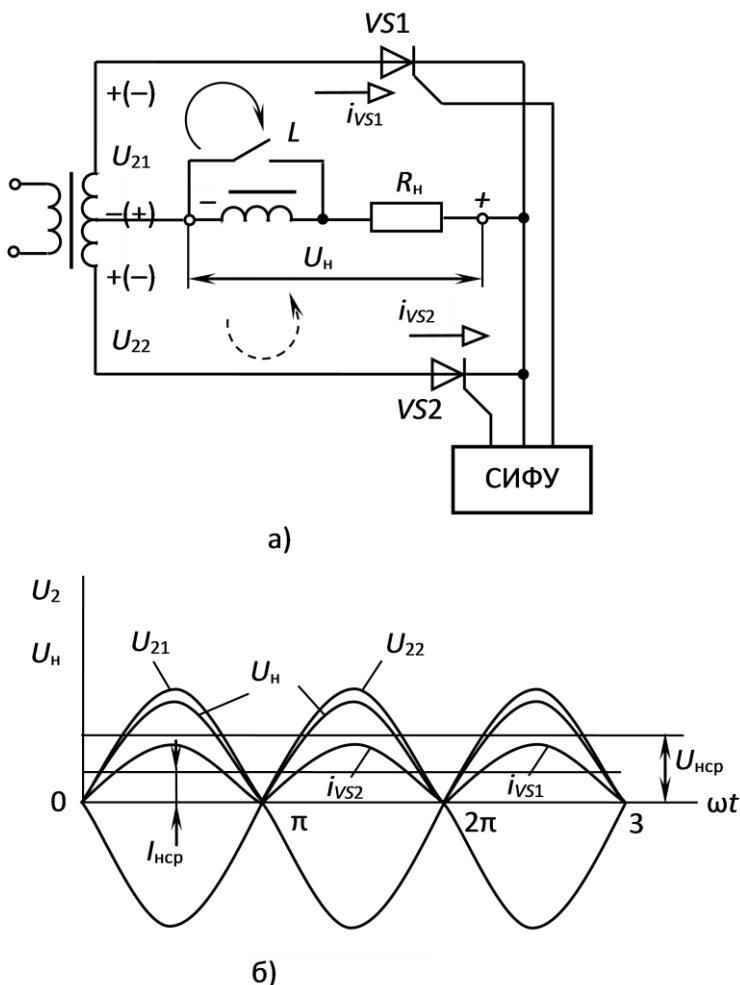


Рисунок 12.1 Однофазный управляемый выпрямитель (а), временные диаграммы (б)

трансформатора через открытый тиристор в нагрузку (направление тока выделено жирной стрелкой при полярности напряжения, указанной на рис. 12.1, а). В этом интервале времени тиристор VS2 закрыт отрицательным анодным напряжением.

В следующий полупериод полярность напряжения на полуобмотках трансформатора изменяется, и через открывшийся тиристор VS2 в нижнем контуре протекает ток по направлению штриховой стрелки. В этом интервале времени тиристор VS1 закрыт и не пропускает тока (рис. 12.1, б).

Таким образом в двухполупериодной схеме выпрямления оба тиристора работают поочередно, а в нагрузке протекает пульсирующий ток одного и того же направления.

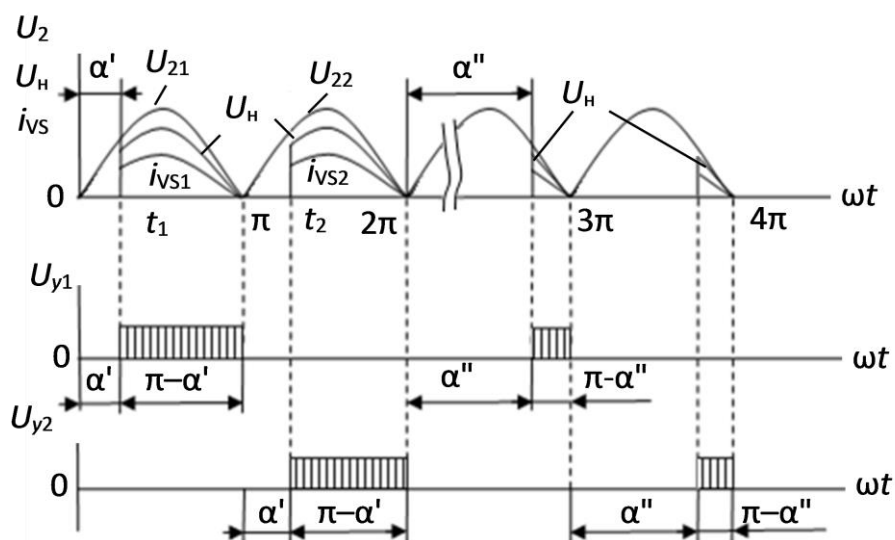


Рисунок 12.2 Регулирование тока в нагрузке

Форма этого тока повторяет огибающую положительных полусинусоид напряжения вторичных полуобмоток трансформатора (рис. 12.1, б), а величина зависит от сопротивления нагрузки и мгновенных значений напряжения. Форма выпрямленного напряжения на нагрузке в идеальном случае приближается к огибающей положительных полусинусоид напряжения вторичных полуобмоток трансформатора.

Для регулирования тока в нагрузке каждый тиристор необходимо включать с некоторым запаздыванием по отношению к точке естественного открывания. Такое включение производится положительными импульсами, подаваемыми поочередно от СИФУ на управляющие электроды тиристоров с фазовым сдвигом $\omega t_1, \omega t_2, \dots$ (рис. 12.2). Соответствующие этому сдвигу по фазе углы запаздывания в электрических градусах называются углами регулирования и обозначаются буквами α', α'' и т.д.

В данной схеме УВ углы регулирования можно изменять в пределах от 0 до 180° . Рассмотренный ранее граничный случай соответствовал условию $\alpha=0$. При втором граничном случае, $\alpha = 180^\circ$, ни один из тиристоров не сможет

включиться, поскольку моменты подачи управляющих импульсов совпадают с нулевыми значениями напряжений на полуобмотках трансформатора.

Для промежуточных значений $0 < \alpha < 180^\circ$ (рис. 12.2) в течение части положительного полупериода $\omega t = \alpha$ каждый тиристор остается закрытым, а включается только в момент подачи управляющего импульса. При этом ток в нагрузке возрастает скачком и в интервале $\omega t = (\pi - \alpha)$ оставшейся части полупериода изменяется по синусоидальному закону. С увеличением угла α сокращается время работы каждого вентиля и, естественно, снижается среднее значение выпрямленного тока и напряжения (рис. 12.2). Таким образом, при изменении угла регулирования в диапазоне $0 \dots 180^\circ$ эти величины уменьшаются от своих предельных значений $U_{н0}$ (при $\alpha = 0$) до нуля (при $\alpha = 180^\circ$).

Среднее значение выпрямленного напряжения на активной нагрузке (без учета потерь) определяется выражением

$$U_n = U_{н0}(1 + \cos \alpha)/2.$$

Зависимость $U_n = f(\alpha)$ является регулировочной характеристикой управляемого выпрямителя.

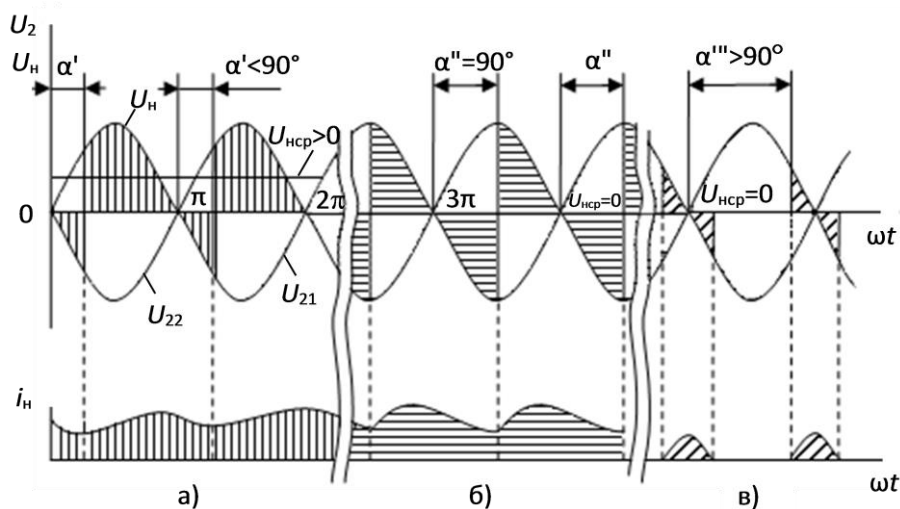


Рисунок 12.3 Временные диаграммы при индуктивной нагрузке

При работе на активно-индуктивную нагрузку кривая тока остается непрерывной (рис. 12.3, а), поскольку энергия, запасенная в дросселе в проводящую часть полупериода, расходуется на поддержание тока до момента включения следующего тиристора. Теоретически, при $L \rightarrow \infty$, форма тока в нагрузке должна представлять собой прямую линию, а в каждом плече выпрямителя – прямоугольник.

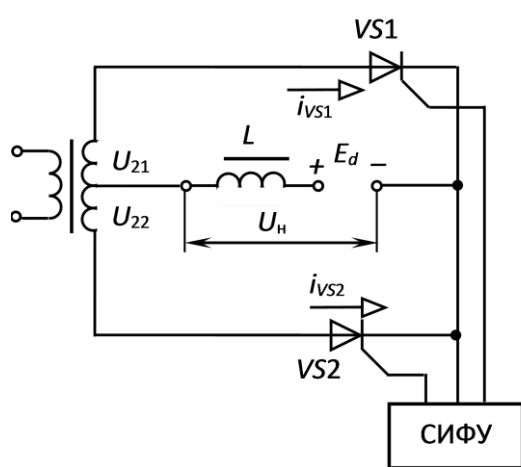
Нельзя не отметить, что при индуктивном характере нагрузки тиристоры могут оставаться открытыми даже при отрицательном уровне напряжения каждой полуобмотки, пока ЭДС самоиндукции способствует протеканию непрерывного тока (рис. 12.3). Такие условия работы сохраняются только до

значений $\alpha < 90^\circ$, случаю $\alpha = 90^\circ$ соответствуют равновеликие площади положительных и отрицательных участков полусинусоид (сравните заштрихованные площадки на рис. 12.3, б). При этом среднее значение выпрямленного напряжения равно нулю.

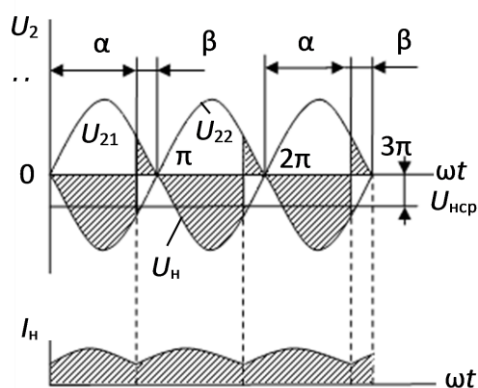
Для чисто индуктивной нагрузки регулировочная характеристика подчиняется косинусоидальному закону, $U_n = U_{н0} \cos \alpha$. При конечных значениях индуктивности в нагрузочной цепи эта кривая отклоняется от косинусоиды в сторону больших предельных углов регулирования.

Внешние характеристики управляемого выпрямителя $U_n = f(I_n)$ при фиксированных значениях угла регулирования ($\alpha = \text{const}$) образуют семейство прямых линий с постоянным наклоном, поскольку величина падения напряжения в элементах схемы УВ не зависит от угла α .

Инвертор



а)



б)

Рисунок 12.4 Инвертор (а),
временные диаграммы (б)

Инвертированием называется преобразование постоянного тока в переменный ток определенной величины и частоты. В связи с изменением направления потока энергии выходным звеном инвертора становится трансформатор, а на входные зажимы подключается независимый источник постоянного тока. Полярность его выбирается противоположной (по отношению к режиму выпрямления), чтобы обеспечить прямую проводимость вентилей. Для получения переменного напряжения необходимо периодически прерывать постоянный ток и распределять его по обмоткам (фазам) трансформатора тем или иным способом. В управляемых преобразователях функции ключей-распределителей выполняют тиристоры.

В зависимости от того, какими средствами осуществляется переход тока от вентилей к вентилю (коммутация тока), различают:

автономные (независимые) инверторы (с принудительной емкостной коммутацией при любой задаваемой частоте);

инверторы, ведомые сетью (с коммутацией напряжением сети при частоте сети).

В данной работе исследуется инвертор второй группы, в котором активная мощность передается от источника ± 120 В в сеть переменного тока при одновременном потреблении реактивной из сети.

В инверторном режиме тиристоры должны пропускать ток преимущественно при отрицательных полупериодах напряжения в каждой полуобмотке.

Их переключение происходит благодаря тому, что напряжение на аноде открываемого тиристора оказывается положительным и более высоким, чем у работающего за счет источника постоянного тока, а также возникающей ЭДС самоиндукции. В этом случае дроссель способствует поддержанию непрерывного тока в каждом контуре, улучшает форму кривой переменного напряжения и фильтрует высшие гармоники.

Из сказанного выше можно сделать вывод, что протекание токов в вентильных полуобмотках трансформатора при изменении полярности ЭДС свидетельствует об изменении направления потока энергии – от источника постоянного тока в сеть переменного тока (рис. 12.4, а).

Переход преобразователя от выпрямительного к инверторному режиму показывают временные диаграммы напряжения и тока (сравните рисунки 12.3 и 12.4).

При углах регулирования $\alpha < 90^\circ$ преобразователь отдает непрерывный ток в активно-индуктивную нагрузку (рис. 12.3, а), и напряжение на ее зажимах положительно ($U_n > 0$).

При установке $\alpha = 90^\circ$ ЭДС самоиндукции дросселя еще поддерживает непрерывный ток, однако напряжение на нагрузке равно нулю. В этом случае трансформатор выпрямителя обменивается с сетью реактивной мощностью (рис. 12.3, б).

При дальнейшем увеличении углов регулирования, $\alpha > 90^\circ$, наступает режим прерывистых токов, поскольку отдаваемая в контур энергия индуктивности дросселя не может превысить запасенную им в проводящую часть периода (рис. 12.3, в).

Если же при $\alpha > 90^\circ$ источник постоянного тока с полярностью, указанной на рис. 12.4, а обеспечивает непрерывный ток, то преобразователь переходит в инверторный режим с изменением знака напряжения

$$U_n = U_{н0} \cos \alpha = U_{н0} \cos(\pi - \beta) = - U_{н0} \cos \beta .$$

Здесь угол β , вводимый по аналогии с выпрямительным режимом, называется углом опережения включения. Этот угол отсчитывается от точек $\omega t = k\pi$ в сторону нуля (рис. 12.4, б), $k = 1, 2, \dots$.

С увеличением угла регулирования α до 180° среднее значение напряжения преобразователя увеличивается. Теоретически, при $\beta = 0$ напряжение холостого хода инвертора соответствует этой же величине при $\alpha = 0$ для управляемого выпрямителя. Однако в реальных условиях необходимо вводить запас по углу $\beta_{\min} \approx 10 \dots 15^\circ$, с тем, чтобы завершить процесс коммутации переключаемых фаз и восстановить управляющие свойства тиристоров до момента их естественного открывания.

Входные характеристики инвертора $U_n = f(I_n)$ при фиксированных значениях углов опережения ($\beta = \text{const}$) подобны внешним характеристикам управляемого выпрямителя.

Предварительное задание к эксперименту

В экспериментальной части данной работы предусмотрено исследование основных характеристик для схемы однофазного преобразователя с выводом нулевой точки трансформатора. Предварительно необходимо для преобразователя, работающего в режиме выпрямителя на чисто активную нагрузку:

1. Рассчитать и построить регулировочную характеристику $U_n = f(\alpha)$ для α в диапазоне от 0° до 180° . При этом принять, что напряжение $U_2 = 127 \text{ В}$.
2. Для значений α , приведенных в таблице 12.1, рассчитать внешнюю характеристику $U_n = f(I_n)$, приняв $x_a = 60 \text{ Ом}$.

ТАБЛИЦА 12.1

| № варианта | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|------------------|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| α , град. | 20 | 40 | 50 | 70 | 80 | 100 | 120 | 150 |

3. Построить совмещенные временные диаграммы $u_2(\omega t)$, $u_n(\omega t)$ и $i_n(\omega t)$ для α , заданного вариантом таблицы 12.1.

Порядок выполнения эксперимента

1. Ознакомиться с назначением всех элементов на передней панели стенда и после разрешения преподавателя подать питание от сети 220 В. Переключатель режима работы поставить в положение “ВЫПРЯМИТЕЛЬ”.

2. Включить осциллограф, подключить его входы к гнездам “управляющий электрод” и “катод” тиристоров и зарисовать форму управляющих импульсов, обратив внимание на изменение их длительности в диапазоне $\alpha = 0 \dots 180^\circ$. Отсчет углов регулирования – по фазоуказателю.

3. Снять регулировочные характеристики управляемого выпрямителя $U_n = f(\alpha)$ для активной (при закороченном дросселе) и активно-индуктивной нагрузки ($R_{n \text{ max}}$). Результаты эксперимента занести в табл. 12.2 и сопоставить с рассчитанной в предварительном задании характеристикой $U_n = f(\alpha)$.

ТАБЛИЦА 12.2

| Угол регулирования, α | | 0° | 30° | 60° | 90° | 120° | 150° | Прим. |
|------------------------------|------------------------------|-----------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------|
| U_n | Активная нагрузка | | | | | | | |
| | Активно-индуктивная нагрузка | | | | | | | |

4. На экране осциллографа просмотреть форму выпрямленного напряжения на нагрузке при включенном дросселе и без него, для разных углов регулирования. Зарисовать осциллограммы при $\alpha=0$ и $\alpha=60^\circ$ при минимальном значении тока нагрузки.

5. Изменяя степенями сопротивление резистора R_n , снять семейство внешних характеристик выпрямителя $U_n=f(I_n)$ для активной и активно-индуктивной нагрузки при фиксированных значениях $\alpha=30^\circ$, 60° и α , заданного табл. 12.1. Результаты эксперимента занести в табл. 12.3 и сопоставить с результатами предварительного расчета.

ТАБЛИЦА 12.3

| | | | | | | | | |
|------------------------------|-------------------|------------------|--|--|--|--|--|--|
| Активная нагрузка | $\alpha=30^\circ$ | $U_n(\text{В})$ | | | | | | |
| | | $I_n(\text{мА})$ | | | | | | |
| | $\alpha=60^\circ$ | $U_n(\text{В})$ | | | | | | |
| | | $I_n(\text{мА})$ | | | | | | |
| | $\alpha=$ | $U_n(\text{В})$ | | | | | | |
| | | $I_n(\text{мА})$ | | | | | | |
| Активно-индуктивная нагрузка | $\alpha=30^\circ$ | $U_n(\text{В})$ | | | | | | |
| | | $I_n(\text{мА})$ | | | | | | |
| | $\alpha=60^\circ$ | $U_n(\text{В})$ | | | | | | |
| | | $I_n(\text{мА})$ | | | | | | |
| | $\alpha=$ | $U_n(\text{В})$ | | | | | | |
| | | $I_n(\text{мА})$ | | | | | | |

6. Перевести преобразователь в режим инвертирования. Для этого установить по фазоуказателю максимальный угол, подать от стабилизированного источника питания постоянное напряжение ± 120 В на стенд и установить переключатель режима работы преобразователя в положение “ИНВЕРТОР”.

Примечание: при этом переключении реле блока защиты замыкает цепь нагрузки и включает реостат последовательно с источником постоянного тока. О нормальной работе лабораторного стенда сигнализирует красная лампочка.

7. Изменяя сопротивление резистора R_n снять семейство входных характеристик инвертора $U_n=f(I_n)$ для фиксированных значений углов регулирования, $\alpha=120^\circ$, $\alpha=150^\circ$ (соответственно $\beta=60^\circ$ и $\beta=30^\circ$). Данные эксперимента внести в табл. 12.4.

ТАБЛИЦА 12.4

| | | | | | | |
|--|------------------|--|--|--|--|--|
| $\beta=30^\circ$ ($\alpha=150^\circ$) | $I_n(\text{мА})$ | | | | | |
| | $U_n(\text{В})$ | | | | | |
| $\beta=60^\circ$ ($\alpha=120^\circ$) | $I_n(\text{мА})$ | | | | | |
| | $U_n(\text{В})$ | | | | | |

После окончания эксперимента переключатель режима работы поставить в положение “ВЫПРЯМИТЕЛЬ”. Снять питание постоянного тока, отключить напряжение сети, схему привести в исходное состояние.

Содержание отчета

Схема лабораторной установки. Результаты предварительного расчета. Временные диаграммы управляющих импульсов СИФУ. Регулировочные характеристики УВ для активной и активно-индуктивной нагрузки (на одном графике). Семейства внешних характеристик управляемого выпрямителя и входных характеристик инвертора (на одном графике). Осциллограммы выпрямленного напряжения для активной и активно-индуктивной нагрузки при $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 60^\circ$.

Контрольные вопросы

1. Опишите работу УВ и назовите область его применения.
2. Объясните различие между режимом выпрямления и инвертирования.
3. Перечислите достоинства и недостатки управляемых преобразователей.
4. Что представляют собой регулировочные характеристики УВ?
5. Какие функции выполняет дроссель в схеме УВ?
6. Объясните ход внешних характеристик управляемого выпрямителя и входных характеристик инвертора.
7. Как изменяется величина пульсации выпрямленного напряжения при изменении углов регулирования и при изменении величины тока?

Лабораторная работа № 13

ФОТО- И ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

Цель работы: изучение структуры, основных характеристик фотодиода и фоторезистора, принципа функционирования простейших устройств на оптронах.

Общие сведения

О п т о э л е к т р о н и к о й называют научно-техническое направление, в котором для передачи, обработки и хранения информации используются электрические и оптические средства и методы. В оптоэлектронике световой луч выполняет те же функции управления, преобразования и связи, что и электрический сигнал в электрических цепях.

Устройства оптоэлектроники обладают некоторыми существенными преимуществами по сравнению с чисто электронными устройствами. В них обеспечивается полная гальваническая развязка между входными и выходными цепями. Отсутствует обратное влияние приемника сигнала на его источник. Облегчается согласование между собой электрических цепей с разными входными и выходными сопротивлениями. Оптоэлектронные приборы имеют широкую полосу пропускания и преобразования сигналов, высокое быстродействие и большую информационную емкость оптических каналов связи ($10^{13} \dots 10^{15}$ Гц). На оптические цепи не оказывают влияние различные помехи, вызванные электрическими и магнитными полями.

К недостаткам оптоэлектронных компонентов относятся: низкая температурная и временная стабильность характеристик; сравнительно большая потребляемая мощность; сложность изготовления универсальных устройств для обработки информации; меньшие функциональные возможности по сравнению с ИМС, необходимость жестких требований к технологии изготовления.

Оптоэлектронные приборы излучают и преобразуют излучение в инфракрасной, видимой или ультрафиолетовой областях спектра. Основным компонентом оптоэлектроники является пара с фотонной связью, называемая

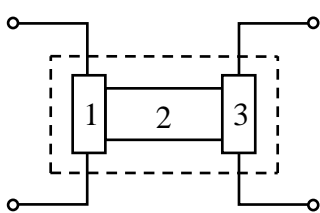


Рисунок 13.1
Структура оптрона

оптроном. Простейший оптрон можно представить четырехполюсником, состоящим из трех элементов: источник света – 1, световод – 2 и приемник света – 3 (рис. 13.1).

Входной сигнал в виде импульса или перепада входного тока возбуждает фотоизлучатель и вызывает световое излучение. Световой сигнал по световоду попадает в фотоприемник, на выходе которого образуется электрический импульс или перепад выходного тока. В оптронных устройствах в качестве источников света применяются обычно лампы накаливания, электролюминесцентные конденсаторы или светодиоды. В качестве приемников света используют фоторезисторы, фотодиоды,

фототиристоры, фототранзисторы и различные комбинации этих приборов. Условные обозначения некоторых типов оптронов показаны на рис. 13.2.

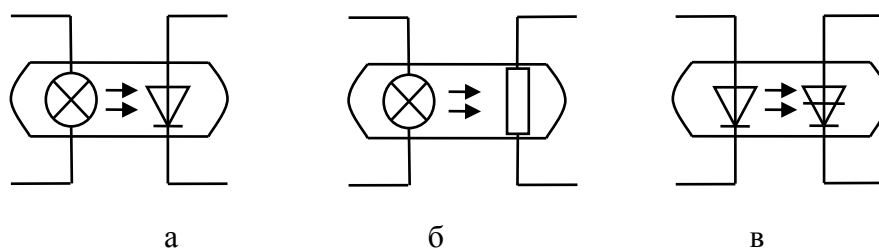


Рисунок 13.2 Оптроны
(а – диодный, б – резисторный, в – динисторный)

Работа фоторезисторов основана на явлении изменения сопротивления вещества под воздействием внешнего светового излучения. Конструктивно фоторезистор представляет собой пластину полупроводника, на поверхности которой нанесены электроды. Структура фоторезистора и условное обозначение показаны на рис. 13.3, где 1 – диэлектрическая пластина; 2 – полупроводник;

3 – контакты фоторезистора.

Основными характеристиками фоторезистора являются:

1. Вольтамперная характеристика – зависимость тока I через фоторезистор от напряжения U , приложенного к его выводам, при различных значениях светового потока Φ , либо освещенности E (рис. 13.4). Ток

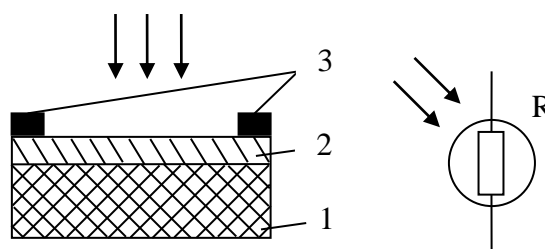


Рисунок 13.3
Структура фоторезистора

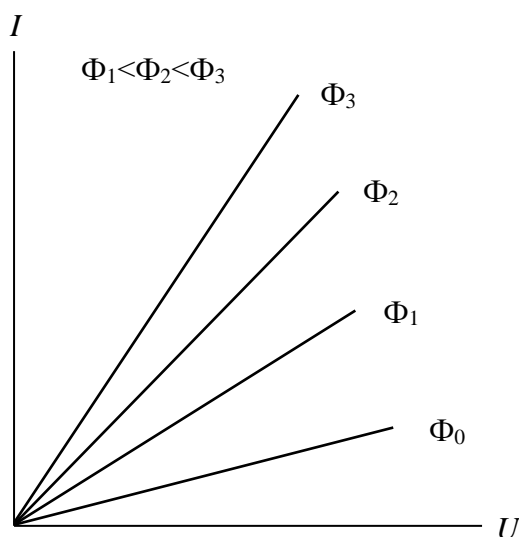


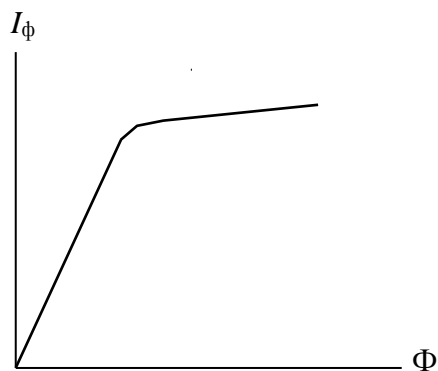
Рисунок 13.4
ВАХ фоторезистора

при $\Phi = 0$ называется темновым током I_t , при $\Phi > 0$ – общим током $I_{общ}$. Их разность равна фототоку $I_\Phi = I_{общ} - I_t$.

Энергетическая характеристика – это зависимость фототока от светового потока, либо освещенности при $U = const$. В области малых Φ она линейна, а при увеличении светового потока рост фототока замедляется из-за возрастания вероятности рекомбинации носителей заряда (рис. 13.5). Энергетическая характеристика иногда называется люксамперной, в том случае, если по оси абсцисс откладывают освещенность E в люксах.

3. Чувствительность – это отношение выходной величины ко входной. В зависимости от того, какой

величиной характеризуется излучение, различают токовую чувствительность к потоку



$$S_{\Phi} = \frac{I_{\Phi}}{\Phi}$$

итокую чувствительность к освещенности E

$$S_E = \frac{I_{\Phi}}{E}$$

Рисунок 13.5
Энергетическая характеристика

В качестве одного из основных параметров фоторезистора используют величину удельной

интегральной чувствительности, которая характеризует интегральную чувствительность, когда к фоторезистору приложено напряжение 1 В:

$$S_{\Phi \text{ инт уд}} = \frac{I_{\Phi}}{\Phi U}.$$

У промышленных фоторезисторов удельная интегральная

чувствительность имеет пределы десятые, сотые доли $\frac{\text{мА}}{\text{В} \cdot \text{лм}}$ при освещенности $E=200$ лк.

Важными характеристиками фоторезистора являются также: спектральная характеристика; граничная частота сигнала, модулирующая световой поток; температурный коэффициент фототока и пороговый поток.

Фотодиоды имеют структуру обычного p - n -перехода (рис. 13.6, а, б), где а – условное обозначение фотодиода, б – структура фотодиода. Вследствие оптического возбуждения в p и n областях возникает неравновесная концентрация носителей заряда.

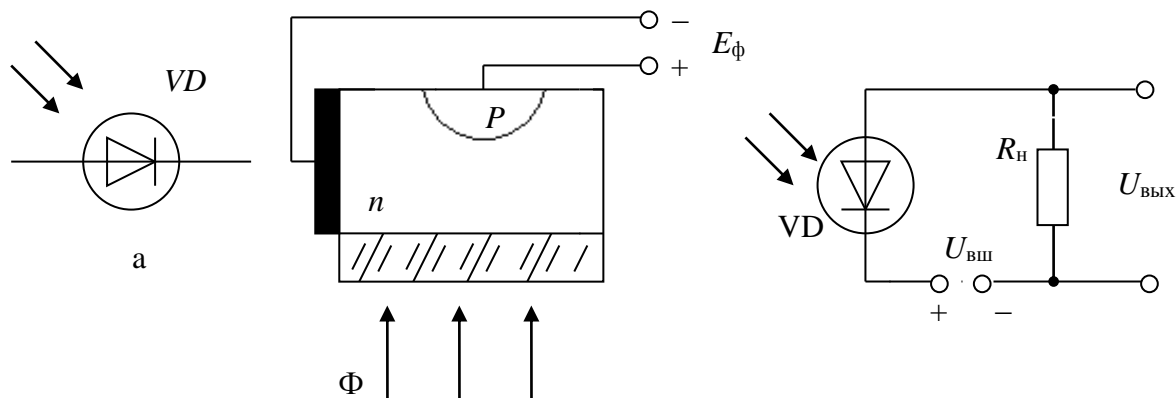


Рисунок 13.6 Фотодиод

На границе перехода неосновные носители заряда под влиянием электрического поля, перебрасываются через переход в область, где они являются основными носителями. Электрический ток, созданный ими, есть полный фототок. Если p - n -переход разомкнут, то перенос носителей заряда, генерируемых светом, приводит к накоплению отрицательного в n -области и положительного в p -области зарядов. Новое равновесное состояние соответствует меньшей высоте потенциального барьера, равной $(U_k - E_f)$. ЭДС E_f , возникающую при этих процессах, на значение которой снижается потенциальный барьер U_k в p - n -переходе, называют фотоперемещающей силой (фото-ЭДС). В данной ситуации фотодиод работает в режиме фотогенератора, преобразуя световую энергию в электрическую.

Фотодиод может работать совместно с внешним источником (рис. 13.6, в). При освещении фотодиода поток неосновных носителей заряда через p - n -переход возрастает. Увеличивается ток во внешней цепи, определяемый напряжением источника и световым потоком. Значение фототока можно найти из выражения $I_{\phi} = S_{\text{инт}}\Phi$, где $S_{\text{инт}}$ – интегральная чувствительность. Вольтамперные характеристики освещенного p - n -перехода показаны на рис. 13.9, б. Фототок суммируется с обратным током теплового происхождения.

К основным характеристикам фотодиода относят:

1. Энергетические характеристики, которые связывают фототок со световым потоком. Причем фотодиод может быть включен без внешнего источника ЭДС (генераторный режим), так и с внешним источником (рис. 13.7).

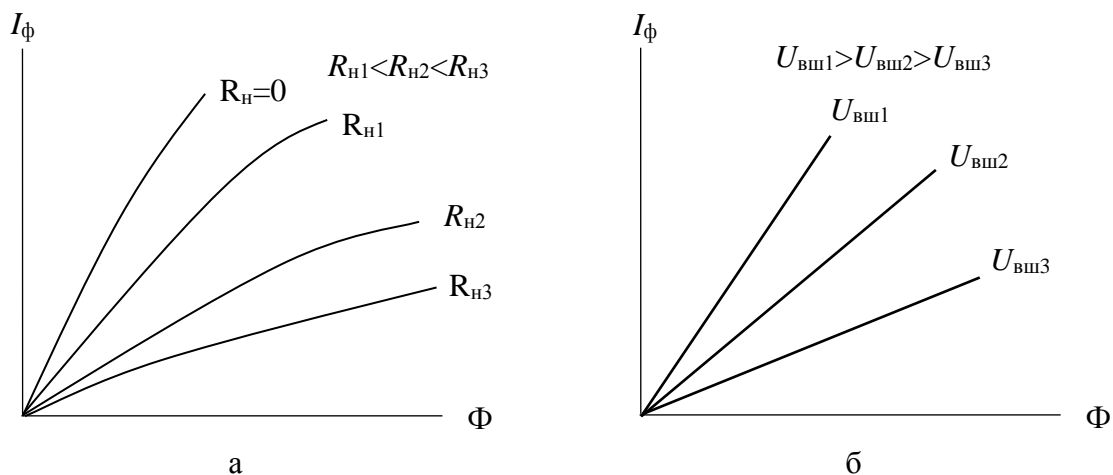


Рисунок 13.7

а – генераторный режим; б – при работе с внешним источником

2. Абсолютные и относительные спектральные характеристики – это зависимости абсолютной либо относительной чувствительности от длины волны регистрируемого потока излучения. Они аналогичны соответствующим характеристикам фоторезистора и зависят от материала полупроводника и введенных примесей.

В качестве фотоприемников в оптронных устройствах также используются фототиристоры и фототранзисторы.

У фототранзисторов интегральная чувствительность значительно выше, чем у диода и составляет сотни миллиампер на люмен.

Биполярный фототранзистор представляет собой обычный транзистор, но в корпусе его сделано прозрачное окно, через которое световой поток воздействует на область базы, вызывая в ней генерацию носителей зарядов. Они диффундируют к коллекторному переходу, где происходит их разделение. Дырки под воздействием поля коллектора идут из базы в коллектор и увеличивают ток коллектора, а электроны, оставаясь в базе, повышают прямое напряжение эмиттерного перехода, что усиливает инжекцию дырок в этом переходе. Если базовый вывод транзистора не подключается к схеме, то такое включение называют с “плавающей” базой. В этом случае режим работы транзистора будет сильно зависеть от температуры. Вывод базы используют для задания оптимального режима работы фототранзистора, при котором достигается максимальная чувствительность к световому потоку.

Фототиристоры имеют четырехслойную структуру (рис. 13.8, а) и управляются световым потоком, подобно тому, как триодные тиристоры управляются током, подаваемым в цепь управляющего электрода. При действии света на область базы p_1 в этой области генерируются электроны и дырки.

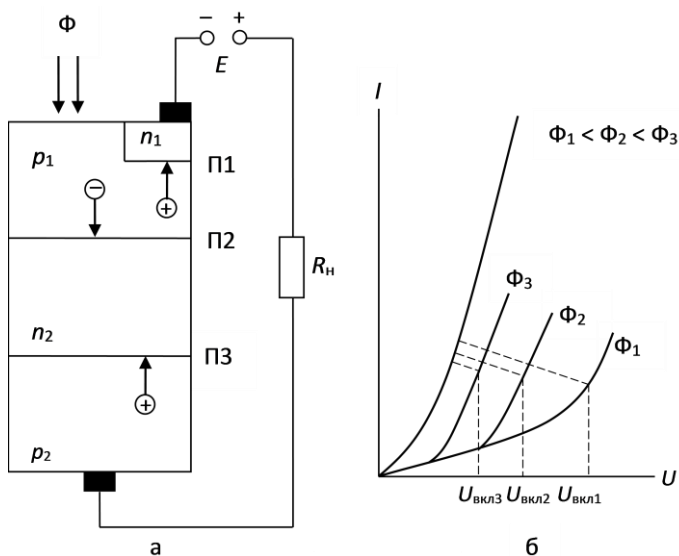


Рисунок 13.8 Фототиристор

Электроны, попадая в область перехода П2, находящегося под обратным напряжением, уменьшают его сопротивление. В результате происходит увеличение инжекции носителей из переходов П1 и ПЗ. Ток через структуру прибора лавинообразно нарастает, т.е. тиристор отпирается. Чем больше световой поток, действующий на тиристор, тем при меньшем напряжении включается тиристор (рис. 13.8, б).

Фототиристоры могут успешно применяться в различных автоматических устройствах в качестве бесконтактных ключей для включения значительных напряжений и мощностей. Важные достоинства тиристоров: малое потребление мощности во включенном состоянии, малые габариты, отсутствие искрения, малое время включения.

Предварительное задание к эксперименту

Используя вольтамперные характеристики (рис. 13.9: а – фоторезистора, б – фотодиода), а также данные таблицы 13.1, для заданного вариантом U найти

значения фототока $I_{\text{ф}}$, и по полученным значениям построить энергетическую характеристику фотоэлектронного прибора. Определить величину токовой чувствительности к освещенности S_E при $E=200$ лк.

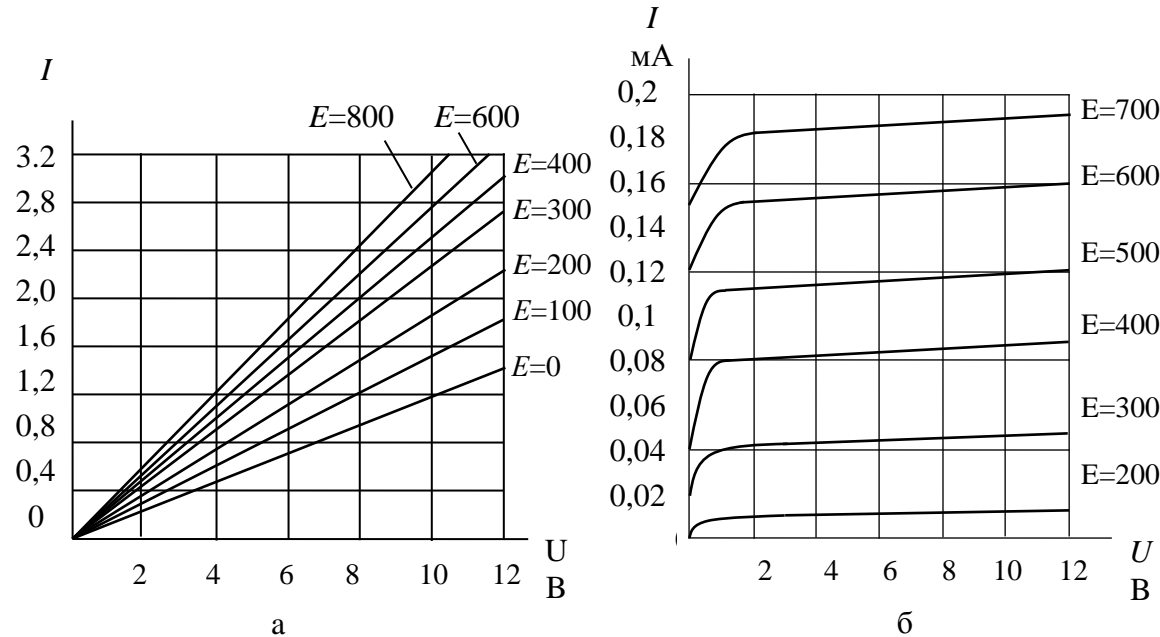


Рисунок 13.9

ТАБЛИЦА 13.1

| Тип прибора | Фоторезистор | | | | Фотодиод | | | |
|-----------------------|--------------|---|---|---|----------|---|---|----|
| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Напряжение на приборе | 10 | 8 | 6 | 4 | 2 | 4 | 8 | 12 |

Порядок выполнения эксперимента

1. Перед началом выполнения работы привести стенд в исходное состояние. Для этого ручки регуляторов Р1 и Р2 повернуть влево до упора, выключатели В1, В2, В3, В5 установить в нижнее положение. Ручку управления Р3 установить в положение А. Соединить с помощью перемычки гнезда Г1 и Г2. Подключить к гнездам Г1 и Г6 цифровой вольтметр. Переключатель пределов измерения микроамперметра В4 установить в положение наименьшей чувствительности $\times 100$ и в дальнейшем, перед проведением очередного эксперимента, возвращать его в это положение. Подключить стенд к сети. Тумблер В5 установить в верхнее положение.

Примечание: в процессе измерений не допускать «зашкаливания» прибора!

1. Снять вольтамперную характеристику $I_{\text{ф}}(U)$ фоторезистора. Для этого ручку переключателя Р3 установить в положение А, а тумблер В1 перевести в верхнее положение. Данные эксперимента занести в таблицу 13.2.

ТАБЛИЦА 13.2

| $U, \text{В}$ | | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 |
|------------------------|-----------------------|---|---|---|---|----|----|
| $I_{\Phi}, \text{мкА}$ | $E = 0 \text{ лк}$ | | | | | | |
| | $E = 200 \text{ лк}$ | | | | | | |
| | $E = 400 \text{ лк}$ | | | | | | |
| | $E = 1000 \text{ лк}$ | | | | | | |

2. Вернуть в левое положение ручки регуляторов Р1 и Р2. Установить ручкой регулятора Р1 напряжение на фоторезисторе $U = 3 \text{ В}$ и снять зависимость фототока от освещенности $I_{\Phi}(E)$, задавая значение E регулятором Р2, поддерживая постоянным напряжение на фоторезисторе ручкой Р1. Полученные значения занести в таблицу 13.3.

ТАБЛИЦА 13.3

| $E, \text{лк}$ | 0 | 100 | 200 | 400 | 1000 | 1200 | 1500 | 2000 |
|------------------------|---|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| $I_{\Phi}, \text{мкА}$ | | | | | | | | |

Соединить перемычкой гнезда Г1 и Г3, тумблер В1 должен находиться в верхнем положении. Снять вольтамперные характеристики фотодиода для различных значений освещенности E . Напряжение на фотодиоде устанавливать регулятором Р1. Полученные данные занести в таблицу 13.4.

ТАБЛИЦА 13.4

| $U, \text{В}$ | | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 |
|------------------------|-----------------------|---|---|---|---|----|----|
| $I_{\Phi}, \text{мкА}$ | $E = 200 \text{ лк}$ | | | | | | |
| | $E = 400 \text{ лк}$ | | | | | | |
| | $E = 1000 \text{ лк}$ | | | | | | |

Для снятия энергетических характеристик фотодиода в генераторном режиме установить тумблер В1 в нижнее положение, ручки регуляторов Р1 и Р2 в крайнее левое положение. Соединить перемычкой гнезда Г1 с Г3 (в режиме $R_{\text{н}} = 0$), с Г4 ($R_{\text{н}} = 200 \text{ Ом}$), с Г5 ($R_{\text{н}} = 500 \text{ Ом}$). Снять зависимость фототока I_{Φ} от освещенности E . Данные занести в таблицу 13.5.

ТАБЛИЦА 13.5

| $E, \text{лк}$ | | 200 | 400 | 1000 | 1200 | 1500 | 2000 |
|------------------------|-------------------------------|-----|-----|------|------|------|------|
| $I_{\Phi}, \text{мкА}$ | $R_{\text{н}}=0$ | | | | | | |
| | $R_{\text{н}}=200 \text{ Ом}$ | | | | | | |
| | $R_{\text{н}}=500 \text{ Ом}$ | | | | | | |

Перевести тумблер В1 в верхнее положение и снять энергетические характеристики фотодиода для случая, когда напряжение внешнего источника $U_{\text{вн}}$ отлично от нуля. Полученные значения занести в таблицу 13.6.

ТАБЛИЦА 13.6

| $E, \text{лк}$ | | 200 | 400 | 1000 | 1200 | 1500 | 2000 |
|------------------------|-----------------------------|-----|-----|------|------|------|------|
| $I_{\Phi}, \text{мкА}$ | $U_{\text{вн}}=2 \text{ В}$ | | | | | | |
| | $U_{\text{вн}}=4 \text{ В}$ | | | | | | |

6. Исследовать работу порогового устройства, состоящего из динисторного оптрона и элемента, выполняющего функцию логического И. При подаче на вход элемента И двух логических единиц (тумблеры В1 и В2 в верхнем положении), на выходе формируется сигнал высокого уровня, о чем сигнализирует зажигающийся светодиод VD1. В результате этого загорается и светодиод оптрона VD2, освещающий динистор оптрона и вызывающий его включение, о чем сигнализирует лампочка Л1.

По окончании работы тумблер В5 перевести в нижнее положение, отключить стенд от сети.

Содержание отчета

Расчет предварительного задания к эксперименту. Таблицы экспериментальных значений. Энергетическая характеристика, построенная по данным предварительного задания и сравнительный анализ ее вида с аналогичной характеристикой, построенной по экспериментальным данным. Вольтамперные и энергетические характеристики фоторезистора, построенные по снятым значениям. Вольтамперные и энергетические характеристики фотодиода в генераторном режиме и режиме с внешним источником напряжения.

Контрольные вопросы

1. Перечислите достоинства и недостатки оптоэлектронных приборов.
2. Назовите основные характеристики фоторезисторов.
3. Почему световые характеристики фоторезисторов нелинейны?
4. Что такое удельная чувствительность фоторезистора?
5. Назовите возможные режимы работы фотодиодов.
6. Опишите механизм образования фото-ЭДС при освещении светом *p-n*-перехода.
7. Перечислите основные параметры фотодиода.

Лабораторная работа № 14

ИССЛЕДОВАНИЕ АРИФМЕТИКО-ЛОГИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА

Цель работы: изучить принцип действия регистров и АЛУ; освоить методику вычислений и простейшие математические операции.

Общие сведения

Арифметико-логическое устройство (АЛУ) является основным функциональным узлом микропроцессора, предназначенным для обработки данных. АЛУ представляет собой комбинационную логическую схему, выполняющую логические и арифметические действия.

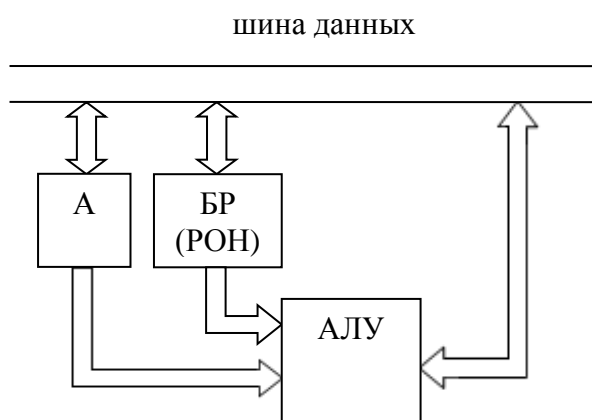


Рисунок 14.1
Структура АЛУ

Для ввода, вывода и оперативного хранения информации, а также ее пошаговой загрузки по тактовому импульсу в АЛУ предназначен блок регистров: аккумулятор (А), буферные регистры (БР) или регистры общего назначения (РОН) (рис. 14.1).

Совместная работа АЛУ и аккумулятора позволяет реализовать ряд арифметических и логических операций, в том числе сложение, вычитание, инверсию, сравнение, положительное или

отрицательное приращение, сдвиг влево или вправо, логическое И, ИЛИ, исключающее ИЛИ и т.п. Из перечисленных элементарных операций набираются сложные задачи современной микропроцессорной техники.

Для изучения возможностей и имитации работы простого микропроцессора предназначена группа интегральных схем повышенной степени интеграции, входящих в состав лабораторного стенда.

Универсальная микросхема К155ИПЗ (рис. 14.2) представляет собой четырехразрядное АЛУ. Основу этой микросхемы составляют 30 простых логических элементов типа И-НЕ, И-ИЛИ-НЕ, исключающие ИЛИ и инверторов.

АЛУ может формировать 16 логических операций и выполнять 16 арифметических действий, включая суммирование и вычитание, увеличение и уменьшение, удвоение и инверсию. Все операции производятся

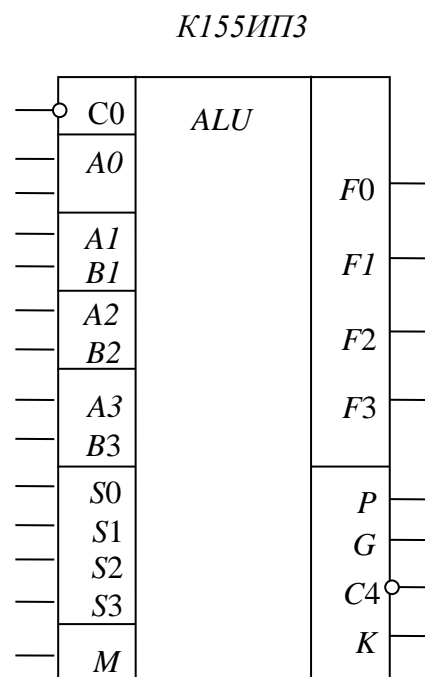


Рисунок 14.2
АЛУ четырехразрядное

над четырехразрядными числами в двоичных кодах, причем одно из чисел подается на входы $A3...A0$, второе - на входы $B3...B0$, а результат вычислений появляется на выходах $F3...F0$. Характер операций АЛУ зависит от уровня сигнала на входе режима M : при $M=0$ выполняются арифметические, а при $M=1$ - логические операции. Причем последние выполняются поразрядно. Вид выполняемых операций зависит от кода операции, подаваемого на управляющие входы $S3...S0$, в соответствии с табл. 14.1.

ТАБЛИЦА 14.1

| Код операции | | | | Вид операции | |
|--------------|------|------|------|---|-------------------------------------|
| $S3$ | $S2$ | $S1$ | $S0$ | Арифметические ($M=0$) | Логические ($M=1$) |
| 0 | 0 | 0 | 0 | $F=A+C_0$ | $F=\overline{A}$ |
| 0 | 0 | 0 | 1 | $F=A \vee B+C_0$ | $F=\overline{A \vee B}$ |
| 0 | 0 | 1 | 0 | $F=\overline{A \vee B}+C_0$ | $F=\overline{A} \cdot \overline{B}$ |
| 0 | 0 | 1 | 1 | $F=-I+C_0$ | $F=0$ |
| 0 | 1 | 0 | 0 | $F=A+A \cdot \overline{B}+C_0$ | $F=\overline{A \cdot B}$ |
| 0 | 1 | 0 | 1 | $F=A \cdot \overline{B}+(A \vee B)+C_0$ | $F=\overline{B}$ |
| 0 | 1 | 1 | 0 | $F=A-B-I+C_0$ | $F=A \oplus B$ |
| 0 | 1 | 1 | 1 | $F=A \cdot \overline{B}-I+C_0$ | $F=\overline{A \cdot B}$ |
| 1 | 0 | 0 | 0 | $F=A+A \cdot B+C_0$ | $F=\overline{A \vee B}$ |
| 1 | 0 | 0 | 1 | $F=A+B+C_0$ | $F=\overline{A \oplus B}$ |
| 1 | 0 | 1 | 0 | $F=A \cdot B+(A \vee \overline{B})+C_0$ | $F=B$ |
| 1 | 0 | 1 | 1 | $F=A \cdot B-I+C_0$ | $F=A \cdot B$ |
| 1 | 1 | 0 | 0 | $F=A+A+C_0$ | $F=I$ |
| 1 | 1 | 0 | 1 | $F=A+(A \vee B)+C_0$ | $F=\overline{A \vee B}$ |
| 1 | 1 | 1 | 0 | $F=A+(\overline{A \vee B})+C_0$ | $F=A \vee B$ |
| 1 | 1 | 1 | 1 | $F=A-I+C_0$ | $F=A$ |

Обозначения: \vee - логическое сложение; \cdot - логическое умножение;
 \oplus - сложение по модулю 2 (исключающее ИЛИ); $+$ - арифметическое сложение; $-$ - арифметическое вычитание; $F=A+A$ - сдвиг влево на один разряд.

Ряд арифметических операций можно использовать либо для загрузки операндов (например, $F=A$ или $F=B$ для $A=0$ при $S=0000$ или $S=1001$ соответственно), либо для сложения в прямом коде $F=A+B$, или вычитания в дополнительном коде $F=A-B$, либо для более сложных действий.

При выполнении арифметических операций учитывается признак переноса с предыдущего разряда, подаваемый на вход $\overline{C0}$. При этом формируется признак переноса четвертого разряда $\overline{C4}$. Для удобства наращивания разрядности АЛУ при объединении нескольких микросхем вход и выход признаков переноса выполнены инверсными. При выполнении

логических операций (логическое И, ИЛИ, исключающее ИЛИ и т.п.) с использованием прямых или инверсных кодов состояние входа переноса $\overline{C0}$ не влияет на полученные результаты.

Для расширения функциональных возможностей АЛУ предусмотрены выходы образования переноса G и распространения переноса P : первый переключается при достижении $1111_2=15_{10}$, а второй - при появлении переноса в любом из четырех разрядов.

В схеме АЛУ предусмотрена также возможность сравнения операндов: если $A=B$, то на выходе K появляется уровень логической единицы.

Микросхема K155ИР13 (рис. 14.3) представляет собой восьмиразрядный

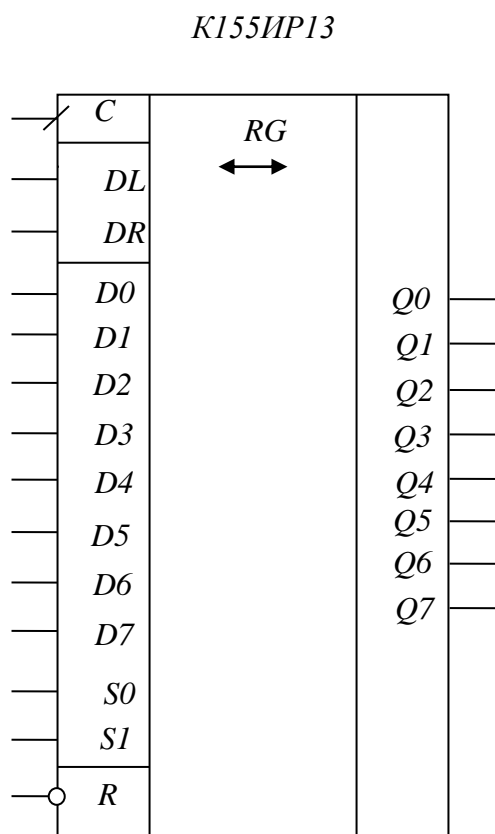


Рисунок 14.3
Реверсивный регистр

сдвигающий регистр, предназначенный для записи информации в параллельном или последовательном коде, ее хранения или сдвига влево и вправо. Основу этой микросхемы составляет 8 синхронизируемых триггеров в сочетании с логическими элементами И-НЕ, И-ИЛИ-НЕ и инверторами.

Схема имеет восемь входов $D7...D0$ параллельной записи, два входа последовательной записи DL - со сдвигом влево и DR - со сдвигом вправо, управляющие входы $S0$ и $S1$ для выбора режима работы, тактовый вход C и установочный вход \overline{R} , а также восемь выходов $Q7...Q0$.

В зависимости от состояний установочного входа и управляющих входов $S0$ и $S1$ схема может работать в различных режимах (табл. 14.2).

Как видно из табл. 14.2, параллельная запись информации осуществляется через входы $D7...D0$ при $S0 = S1 = 1$, и ее появление на выходах $Q7...Q0$ обеспечивается синхронно по положительному фронту тактового

импульса.

Примечание: при переключении регистра сдвига в режим «хранение» необходимо кнопку «такт» держать в нажатом состоянии.

Если сигнал подавать на вход DL , то при $S1=1$ и $S0=0$ каждый тактовый импульс будет осуществлять ее последовательную запись с одновременным сдвигом влево. Как известно, такая операция эквивалентна умножению двоичного числа на два. При $S1=0$ и $S0=1$ по входу осуществляется последовательная запись со сдвигом вправо, что эквивалентно делению двоичного числа на два

ТАБЛИЦА 14.2

| Режим работы | Состояние входов | | | | | Такт C |
|---|------------------|------------|------|------------|------|-------------|
| | уст. | код режима | | посл. зап. | | |
| | \overline{R} | $S1$ | $S0$ | DL | DR | |
| Установка в “0” (сброс) | 0 | x | x | x | x | x |
| Параллельная запись | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | \lceil |
| Последовательная запись со сдвигом влево | 1 | 1 | 0 | 0/1 | 0 | \lceil |
| Последовательная запись со сдвигом вправо | 1 | 0 | 1 | 0 | 0/1 | \lceil |
| Хранение | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | \lceil |

Естественно, что при отсутствии тактового импульса записанная информация будет храниться в регистре до прихода нового импульса, точнее перепада 0/1. Вместе с тем, режим хранения обеспечивается и при установке $S2=S1=0$ как результат запрета на переключение триггеров.

K155ПП1

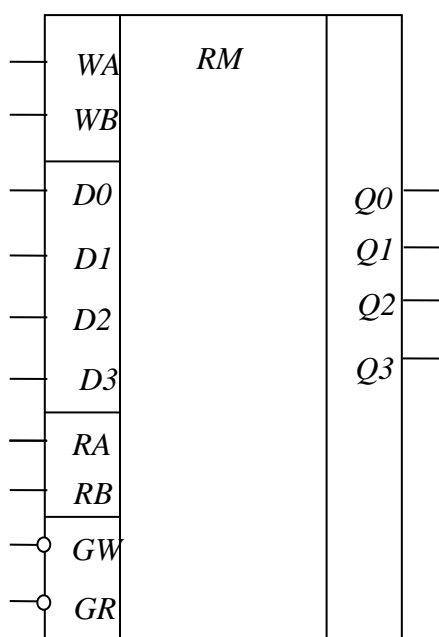


Рисунок 14.4
Регистр памяти

Микросхема K155ПП1 (рис. 14.4), представляет собой четырехразрядный регистр памяти, предназначенный для записи и хранения информации емкостью 16 бит, и обычно используется в качестве оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) или буферного регистра (БР). Основу схемы составляют 16 триггеров DV-типа, управляемых с помощью логических элементов И-НЕ, И-ИЛИ-НЕ. В структурном отношении регистровая память состоит из матрицы 4x4 элемента, коммутируемой с помощью входного дешифратора и 4 выходных мультиплексоров.

Схема имеет четыре информационных входа $D3...D0$, по два адресных входа записи WB , WA и считывания RB , RA соответственно, отдельные стробирующие входы \overline{GW} и \overline{GR} , а также четыре выхода $Q3...Q0$.

Если на вход \overline{GR} подать стробирующий импульс $\overline{GR}=0$, то, в зависимости от выбранного кода адреса 00...11 на входах WB и WA , производится одновременная запись информации со входов $D3...D0$ только в четыре "вертикальные" ячейки матрицы, соответственно от №№ 1,5,9,11 до №№ 4,8,12,16. При этом каждый триггер в своей ячейке может переключиться при условии $V=1$, которое выполняется только при определенной комбинации сигналов на адресных входах.

Считывание записанной информации из соответствующих "вертикальных" ячеек производится при условии установки необходимого адреса и

разрешается стробом $\overline{GR}=0$. Поскольку выходные логические элементы этой микросхемы выполняются с открытым коллектором, то возможно наращивание емкости памяти при объединении выходов с помощью “Монтажного ИЛИ”.

При считывании информации из ячеек памяти не происходит ее разрушения, даже при многократном обращении к памяти.

Предварительное задание к эксперименту

Выполнить арифметические и логические операции (табл. 14.1) над данными в табл. 14.3 числами, переведя их в двоичный код.

ТАБЛИЦА 14.3

| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-----------------------|---|----|----|----|----|----|----|----|
| <i>A</i> | 9 | 10 | 11 | 12 | 11 | 14 | 5 | 6 |
| <i>B</i> | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 11 | 10 |
| <i>C</i> ₀ | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |

Порядок выполнения эксперимента

1. Ознакомиться со схемотехникой исследуемых ИС и органов управления на лабораторном стенде. Коды режима, операции и адреса на соответствующих входах исследуемых ИС задаются с помощью микротумблеров на передней панели стенда (в нижнем положении - уровень логического нуля, в верхнем - уровень логической единицы). Получить разрешение преподавателя на включение питания.

2. Для исследования сдвигающего регистра К155ИР13 необходимо подавать на информационные входы его младших и старших разрядов сигналы с наборного поля И-ИЛИ, константы с гнезд “лог.0” и “лог.1”, а состояние выходов определять с помощью светодиодных индикаторов.

Устанавливая различные коды режима в соответствии с табл. 17.2 и манипулируя кнопками “набор”, “такт” и “сброс”, реализовать последовательную и параллельную запись, а также сдвиг вправо и влево нескольких слов данных. Одно из слов сохранить в регистре для последующего использования.

3. Для исследования регистра К155РП1 задать поочередно коды адреса 00...11 и записать с наборного поля в регистровую память четыре слова данных, а затем, подав $\overline{GR}=0$, прочесть их с помощью светодиодных индикаторов. Отметить эти результаты в таблице истинности.

4. При исследовании АЛУ К155ИП3 выполнить все операции табл. 17.1 согласно предварительному заданию. При этом на информационные входы *A*3...*A*0 и *B*3...*B*0 необходимо подавать отдельно различные сигналы с наборного поля и с выхода любого регистра; результат операций также отметить в отчете.

5. Используя регистр сдвига и АЛУ по своему прямому назначению, а регистр памяти - в качестве ОЗУ, запишите в последнем результаты ваших вычислений.

6. Используя регистр памяти в качестве буферного регистра, а регистр

сдвига - в качестве аккумулятора, подготовить схему соединений ИС для реализации простой программы микропроцессора: очистка; загрузка; сложение (вычитание); хранение.

При выполнении этой программы необходимо:

- записать один операнд в аккумулятор,
- запомнить второй операнд в буферном регистре,
- получить результат их сложения (вычитания) в АЛУ,
- переслать сумму (разность) в аккумулятор и сохранить ее.

7. В предыдущей схеме реализовать следующие операции:

- приращение на единицу;
- инвертирование (дополнение до 1);
- запись в память.

8. Факультативно. Проверить результаты сложения функций $S = A + \bar{A}$ и $F = A + D$, где $D = \bar{A} + 0001$; и объяснить их. Доказать, что эти результаты будут всегда постоянными.

9. Факультативно. Подготовить схему соединений регистров и АЛУ для умножения двух операндов (по заданию преподавателя).

Для реализации этой задачи (по аналогии с умножением десятичных чисел) необходимо разместить множимое в регистре сдвига, а множитель - в регистре памяти, а с помощью АЛУ обеспечить сложение частичных произведений.

Содержание отчета

Цель работы; условное изображение исследуемых микросхем (рис. 14.2-14.4); рассчитанная в предварительном задании табл. 14.1 с результатами операций по п.4; таблица истинности по п.3; структурная схема соединений по п.6 и п.7.

Контрольные вопросы

1. Поясните смысл используемых в работе терминов: операнд, слово данных, аккумулятор, запись в память, код операции и т.д. 2. Объясните назначение и перечислите функциональные возможности каждой из исследуемых микросхем. 3. Какие основные задачи выполняют регистры и АЛУ в микропроцессорных системах? 4. Чем отличается дополнительный код от прямого и инверсного? 5. С какой целью в микропроцессорах предусматриваются операции инкремента и декремента? 6. Для каких целей в АЛУ предусматриваются выходы образования и распространения переноса? Какая информация появляется на выходе сравнения АЛУ? 7. Каким образом и с какой целью используется проверка содержимого АЛУ на нуль? 8. Предложите методику и способ вычисления задач типа $F = 2(A + B)$; $F = A + B + 1$ (или других по заданию преподавателя). 9. Предложите схемную реализацию устройства для сравнения двух операндов, если $A = \text{const}$, а $B = \text{var}$. 10. Выделите на принципиальных электрических схемах АЛУ и регистров шины данных, адреса и управления. Дайте необходимые пояснения.

Лабораторная работа №15

ИССЛЕДОВАНИЕ АНАЛОГО-ЦИФРОВЫХ И ЦИФРО-АНАЛОГОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Цель работы: изучение принципа действия аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразователей; практическое исследование преобразования напряжений в цифровой код методом поразрядного уравнивания на основе параллельного цифро-аналогового преобразователя с матрицей на весовых резисторах.

Общие сведения

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) преобразуют аналоговые величины в цифровой код и обеспечивают связь различных аналоговых измерителей с цифровыми устройствами. Цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) осуществляют преобразование цифровых величин в аналоговые.

Из многообразия серийно изготавливаемых промышленностью преобразователей по быстродействию, точности и надежности выделяются параллельный ЦАП и АЦП поразрядного уравнивания.

Основным элементом параллельного ЦАП с матрицей на резисторах является операционный усилитель (ОУ) DA , работающий в режиме суммирования входных токов $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$, количество которых равно числу разрядов кода (рис. 18.1).

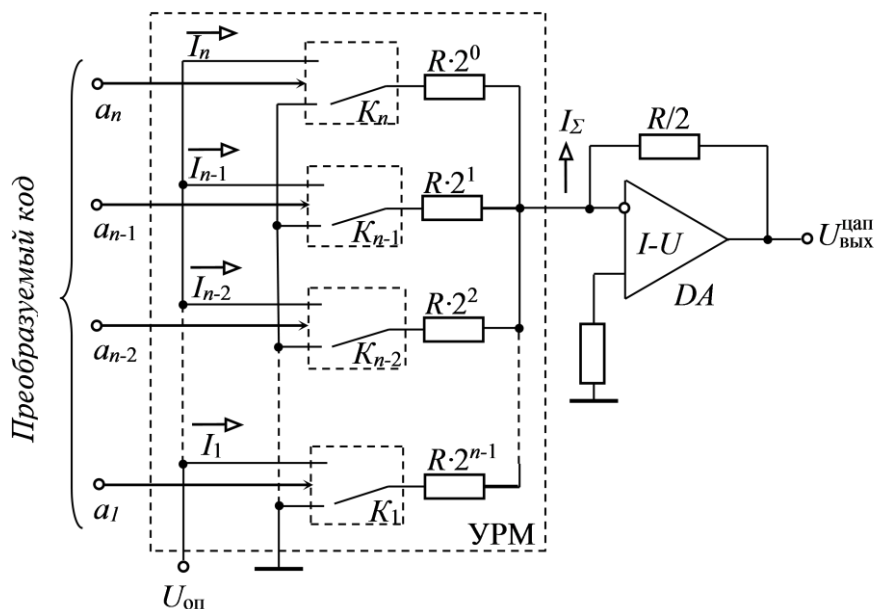


Рис 15.1. Параллельный ЦАП с управляемой резистивной матрицей

Преобразуемый код поступает на входы ключей $K_1, K_2, K_3, \dots, K_n$, и в зависимости от цифры в данном разряде a_i (0 или 1), резисторы подключаются либо к шине “земля”, либо к источнику опорного напряжения $U_{оп}$. Сопротивления резисторов управляемой резистивной матрицы (УРМ) набираются по двоичному коду $R_i = 2^{n-i} \cdot R$. При таких условиях ток

младшего разряда $I_1 = U_{\text{ОП}} / (R \cdot 2^{n-1})$, а суммарный ток усилителя равен сумме всех токов, протекающих от источника $U_{\text{ОП}}$ через ветви с замкнутыми ключами $I_{\Sigma} = (2^{n-1}a_n + 2^{n-2}a_{n-1} + \dots + 2^1a_2 + 2^0a_1)I_1$. Ток I_{Σ} и информационная составляющая выходного напряжения ЦАП на выходе преобразователя ДА «ток – напряжение» (I - U) пропорциональны входному коду

$$U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}} = I_{\Sigma} \cdot R/2 = \left(\frac{U_{\text{оп}}}{2} a_n + \frac{U_{\text{оп}}}{4} a_{n-1} + \dots + \frac{U_{\text{оп}}}{2^{n-1}} a_2 + \frac{U_{\text{оп}}}{2^n} a_1 \right). \quad (1)$$

При этом, если все значения разрядов кода a_1, a_2, \dots, a_n равны единицам, то $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}} = U_{\text{он}} = U_{\text{пр}}$. Приняв $U_{\text{он}} = 10,24$ В при $n = 12$, величина минимального уровня квантования или шага будет равна цене деления цифрового измерительного прибора $\Delta U = U_{\text{он}} / 2^n = 2,5$ мВ. В этом случае при единичных значениях всех 12 разрядов кода набор образцовых напряжений в соответствии с (1) составит:

$$U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}} = U_{\text{он}} = U_{\text{пр}} = 5120 \text{ мВ} + 2560 \text{ мВ} + 1280 \text{ мВ} + 640 \text{ мВ} + 320 \text{ мВ} + 160 \text{ мВ} + 80 \text{ мВ} + 40 \text{ мВ} + 20 \text{ мВ} + 10 \text{ мВ} + 5 \text{ мВ} + 2,5 \text{ мВ} = 10,24 \text{ В}.$$

С позиций оптимального сочетания быстродействия, точности и надежности для построения АЦП может быть использован метод поразрядного уравнивания. Структурная схема АЦП с поразрядным уравниванием представлена на рис. 15.2.

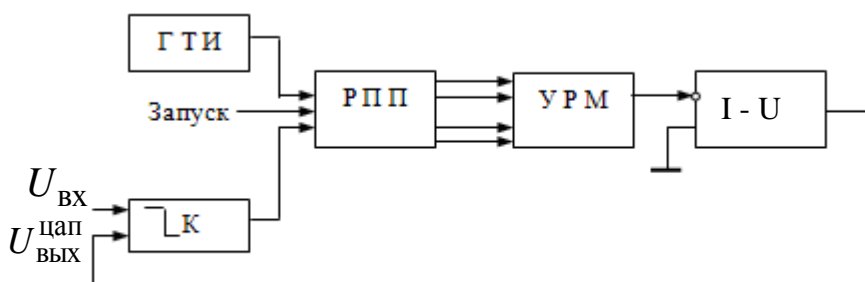


Рисунок 15.2. Структурная схема АЦП с поразрядным уравниванием

После запуска АЦП под действием сигналов генератора тактовых импульсов (ГТИ) в регистре последовательного приближения (РПП) вырабатывается испытательный код, который, начиная от старшего 12-го разряда и кончая первым младшим разрядом, с помощью УРМ и преобразователя I - U преобразуется в уровни испытательного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$. Входное напряжение $U_{\text{ВХ}}$ сравнивается с испытательным напряжением

$U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$ компаратором K , и в зависимости от результата сравнения соответствующее значение (0 или 1) разряда заносится в РПП и учитывается при последующих тактах сравнения. Выходной код РПП является цифровым аналогом $U_{\text{ВХ}}$.

Очевидно, что набор образцовых напряжений не может быть осуществлен с большей точностью, чем шаг дискретизации ΔU . Поэтому значение ΔU определяет основную методическую составляющую погрешность АЦП, и после преобразования (завершения всех 12-ти тактов при $n=12$), установится приблизительное равенство двух сравниваемых напряжений $U_{\text{ВХ}} \approx U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$.

Рассмотрим численный пример (см. табл. 15.1).

ТАБЛИЦА 15.1

| № такта | № разряда | $U_{\text{ВХ}}, \text{ мВ}$ | $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}, \text{ мВ}$ | a_i |
|---------|-----------|-----------------------------|---|-------|
| 1 | 12 | 2720 | 5120 | 0 |
| 2 | 11 | 2720 | 2560 | 1 |
| 3 | 10 | 2720 | 2560+1280 | 0 |
| 4 | 9 | 2720 | 2560+640 | 0 |
| 5 | 8 | 2720 | 2560+320 | 0 |
| 6 | 7 | 2720 | 2560+160 | 1 |
| 7 | 6 | 2720 | 2560+160+80 | 0 |
| 8 | 5 | 2720 | 2560+160+40 | 0 |
| 9 | 4 | 2720 | 2560+160+20 | 0 |
| 10 | 3 | 2720 | 2560+160+10 | 0 |
| 11 | 2 | 2720 | 2560+160+5 | 0 |
| 12 | 1 | 2720 | 2560+160+2,5 | 0 |

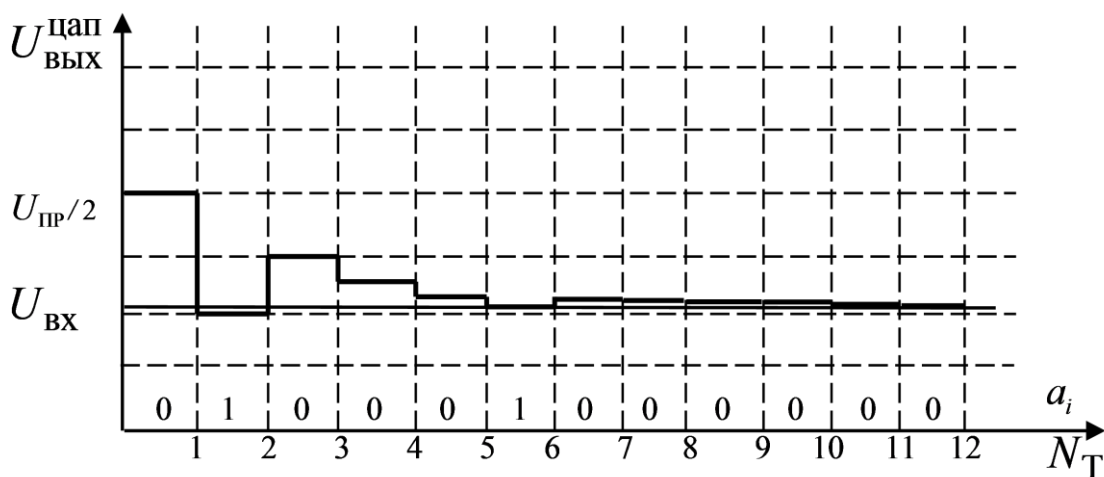


Рисунок 15.3

Пусть. $U_{ВХ} = 2720$ мВ. Так как уровень напряжения старшего разряда равен $U_{пр}/2 = 10240/2 = 5120$ мВ, то значение $a_i = a_{12}$ старшего n -го разряда, зарегистрированное компаратором, будет равно «0» ($U_{ВХ} = 2720 < U_{ВЫХ}^{ЦАП} = 5120$ мВ). Поэтому для первого такта уравнивания будет получено значение $a_i = a_{12} = 0$. Уровень $U_{ВЫХ}^{ЦАП}$ следующего $n-1$ разряда будет в два раза меньше старшего n -го разряда, и компаратор зарегистрирует значение $a_{11} = 1$ ($U_{ВХ} = 2720 > U_{ВЫХ}^{ЦАП} = 2560$ мВ). На третьем такте уравнивания $U_{ВЫХ}^{ЦАП} = 2560 + 2560/2 = 3840$ мВ, и будет зарегистрировано значение $a_{01} = 0$; и т. д. до 12-го последнего такта уравнивания. Значения a_i для всех 12-ти тактов (разрядов) приведены в табл. 15.1. На рис. 15.3 представлена зависимость $U_{ВЫХ}^{ЦАП}$ и a_i в функции от тактов уравнивания N_T . АЦП поразрядного уравнивания исследуется в настоящей работе. Схема установки представлена на рис. 15.4.

АЦП содержит: БИС DA1 типа КР572ПВ1А в специальном включении, выполняющую функции РПП и УРМ; ОУ DA2 типа КР544УД1А (преобразователь I-U); компаратор DA3 типа К554СА3; источник опорного напряжения ИОН; одновибратор ОВ на ИС К561ЛА7; ГТИ; счетчик циклов уравнивания разрядов в одном преобразовании на ИС DD1 типа К155ИЕ5; дешифратор количества импульсов циклов уравнивания на ИС DD3 типа К155ИД3 и инверторе DD2; переключатель количества циклов уравнивания разрядов в одном преобразовании SA4; регулятор входного напряжения $U_{ВХ}$ на резисторе R1; переключатели SA1, SA2 для перевода режима работы схемы из непрерывного в ждущий; переключатель длительности тактовых импульсов (2 сек - 2 мс) SA3; кнопку запуска в ждущем режиме SB1 “запуск”; R-S триггер DD6 конца цикла преобразования; согласующие инверторы DD4, DD5; светодиоды HL1.... HL12 для отображения двоичного выходного кода АЦП; светодиод HL13, индицирующий конец цикла преобразования АЦП; диоды VD1, VD2 для защиты микросхемы от неправильного подключения питающих напряжений; диод VD3 для защиты DA1 при пробое ОУ DA2; клеммы для измерения входного $U_{ВХ}$ и выходного $U_{ВЫХ} = U_{ВЫХ}^{ЦАП}$ напряжений АЦП.

Изучаемый АЦП может работать в трех режимах преобразования:

1. *Ждущий с регулировкой переключателем SA4 количества разрядов и одноразовым запуском цикла преобразования кнопкой SB1.* Переключатели SA1 и SA2 должны быть выключены (в нижнем положении).
2. *Непрерывный или периодический с регулировкой количества разрядов n переключателем SA4 и периодическим автозапуском после каждого преобразования.* Переключатель SA1 находится в безразличном положении (включен или выключен), а SA2 включен (в верхнем положении).
3. *Непрерывный или периодический без регулирования количества n разрядов ($n = 12$).* Переключатель SA1 включен, SA2 выключен.

В одноразовом, *ждущем* режиме запуск АЦП осуществляется выходным импульсом ОВ, поступающим на вход 23 $DA1$ при каждом нажатии кнопки $SB1$ после загорания светодиода $HL13$. Преобразование в каждом цикле (поразрядное) осуществляется под действием выходных импульсов ГТИ, поступающих на вход 21 $DA1$ (на один разряд используется два импульса ГТИ). Период повторения ГТИ (2 с или 2 мс) изменяется переключателем $SA3$ при всех режимах работы. С выхода 38 $DA1$ выходной ток управляемой матрицы поступает в преобразователь на микросхеме $DA2$ «ток – напряжение» ($I-U$), преобразуется в напряжение и поступает на вход компаратора $DA3$. В компараторе это напряжение ($U_{\text{ЦАП}}^{\text{ВЫХ}}$) сравнивается с входным $U_{\text{ВХ}}$. Информация результата сравнения (0 или 1) поступает на вход 19 $DA1$ и запоминается в РПП. После квантования 12 разрядов и сброса всех элементов в исходное состояние включается новый цикл преобразования кнопкой $SB1$. Информация каждого цикла преобразования выводится через согласующие каскады $DD4, DD5$ на светодиоды $HL1...HL12$. Светодиод $HL13$ служит для индикации конца цикла преобразования.

Так как уравнивание осуществляется от старшего разряда к младшему, то и нумерация светодиодов HL для индикации значений a_i разрядов осуществляется от старшего разряда к младшему ($HL1$ – старший, 12-й разряд, а $HL12$ – младший).

При режиме *непрерывной работы с регулировкой количества n разрядов*, независимо от положения переключателя $SA1$, запуск АЦП осуществляется выходным импульсом ОВ по входу “запуск” (23 ножка $DA1$). При этом ОВ запускается через замкнутый переключатель $SA2$ перепадом напряжения с выхода инвертора $DD2$ блока ограничения количества разрядов в цикле преобразования ($DD1, DD2, DD3$). Количество n разрядов в каждом цикле преобразования при этом определяется положением переключателя $SA4$. Ограничиваются младшие, начиная с первого, разряды.

Режим *непрерывной работы без ограничения разрядности* обеспечивается за счет запуска АЦП после окончания преобразования всех 12-ти разрядов цикла и подачи импульсов с 18-го вывода микросхемы $DA1$ «Выход Цикла» через замкнутый переключатель $SA1$ на 24-й вывод “Вход цикла”. Так как на преобразование одного разряда используется 2 импульса ГТИ, то при периоде повторения T напряжения ГТИ для всех 12-ти разрядов с учетом потери такта “конец цикла” и такта на восстановление исходного состояния время полного преобразования (быстродействие АЦП) составит $T_n = 26T$.

Основными параметрами ЦАП и АЦП являются разрешающая способность, точность и быстродействие (время одного преобразования). Разрешающая способность ЦАП и АЦП равна шагу квантования ΔU . Точность АЦП, в основном, определяется погрешностями ЦАП и компаратора. Погрешность АЦП состоит из методической и инструментальной. Методическая погрешность определяется величиной шага ΔU и численно ее значения не выходят за пределы $\pm \Delta U/2$. Инструментальная погрешность

содержит: основную составляющую - погрешность дрейфа нуля (аддитивную составляющую), и погрешность нестабильности чувствительности или нестабильности коэффициента передачи элементов АЦП, в основном, УРМ (мультипликативную составляющую). В большинстве случаев инструментальная погрешность цифровых измерителей значительно меньше методической, и поэтому точность цифровых измерителей часто оценивается величиной относительной приведенной методической погрешности $\gamma \cong 1/2^n$.

Точность ЦАП оценивается погрешностью преобразования входного кода при единичных значениях все разрядных коэффициентов в аналог

$$\gamma_{\text{ЦАП}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}} - U_{\text{ПР}}}{U_{\text{ПР}}} \cdot 100\% .$$

При экспериментальном исследовании погрешность АЦП определяется из выражения:

$$\gamma_{\text{АЦП}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}} - U_{\text{ПР}}}{U_{\text{ПР}}} \cdot 100\% ,$$

где $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}}$ определяется по выходному коду АЦП и выражению (1) при $U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ПР}}$.

Очевидно, экспериментальное значение $\gamma_{\text{АЦП}} > \gamma = 1/2^n$, так как оно содержит также и другие составляющие инструментальной погрешности.

Погрешность преобразования входных напряжений $U_{\text{ВХ}}$ в код АЦП (погрешность преобразования $U_{\text{ВХ}}$) определяется по формуле

$$\gamma_{n\text{АЦП}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}} - U_{\text{ВХ.Э.}}}{U_{\text{ВХ.Э.}}} \cdot 100\% ,$$

где $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}}$ определяется по выходному коду АЦП и выражению (1) при входном напряжении $U_{\text{ВХ}}$; $U_{\text{ВХ.Э.}}$ – напряжение $U_{\text{ВХ}}$, измеренное эталонным вольтметром.

Аналогично определяется и погрешность преобразования входного кода $U_{\text{ВХ}}$ в аналог ЦАП:

$$\gamma_{n\text{ЦАП}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}} - U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}}}{U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}}} \cdot 100\% ,$$

где $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$ – выходное напряжение ЦАП, соответствующее входному коду от исследуемого напряжения $U_{\text{ВХ}}$; $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{АЦП}}$ определяется по коду АЦП (входному коду ЦАП) и выражению (1) при исследуемом напряжении $U_{\text{ВХ}}$.

Как отмечалось, быстродействие АЦП определяется временем одного преобразования $U_{\text{ВХ}}$ в цифровой код.

Предварительное задание к эксперименту

1. Изучить метод поразрядного уравнивания.
2. Построить зависимость выходного напряжения ЦАП $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$ и разрядных коэффициентов a_i в функции от номера такта N_T (разряда) уравнивания $U_{\text{ВХ}}$ при $U_{\text{ВХ}} = 0$ и $U_{\text{ВХ}} \geq U_{\text{пр}} = 10,24$ В для двух значений разрядов преобразования n_1 и n_2 , указанных в табл. 15.2. Результаты расчетов свести в таблицу 15.3.
3. Определить для заданных в табл. 15.2 двух значений разрядов основную приведенную методическую погрешность измерения γ .
4. Для тех же двух значений разрядов определить разрешающую способность АЦП $\Delta U = \frac{U_{\text{пр}}}{2^n}$.

ТАБЛИЦА 15.2

| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| n_1 | 5 | 6 | 7 | 8 | 5 | 6 | 7 | 5 |
| n_2 | 12 | 11 | 10 | 12 | 11 | 10 | 12 | 10 |

ТАБЛИЦА 15.3

| $U_{\text{ВХ}} = 0$ | | | | | | $U_{\text{ВХ}} \geq 10,24$ В | | | | | |
|---------------------|---------|-------------------------------|--|-------|--|------------------------------|---------|-------------------------------|--|-------|--|
| № такта | № разр. | $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$ | | a_i | | № такта | № разр. | $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$ | | a_i | |
| | | | | | | | | | | | |
| 1 | 12 | | | | | 1 | 12 | | | | |
| 2 | 11 | | | | | 2 | 11 | | | | |
| ... | ... | | | | | ... | ... | | | | |
| ... | ... | | | | | ... | ... | | | | |
| 12 | 1 | | | | | 12 | 1 | | | | |

Порядок выполнения эксперимента

1. Подключить к клеммам стенда $U_{\text{ВХ}}$ и $U_{\text{ВЫХ}}^{\text{ЦАП}}$ цифровые вольтметры, к контрольной точке K_2 – вход осциллографа. Установить ждущий режим работы (переключатели $SA1$ и $SA2$ выключены – в нижнем положении). Включить тумблеры напряжения сети макета, осциллографа и вольтметров – в положение “Вкл.”.

2. После 5 минутного прогрева установить потенциометр $R1$ в крайнее левое положение ($U_{ВХ} = 0$) и при $n = 12$ (переключатель $SA4$ – в положение “12”) и длительности такта ГТИ 2 с (переключатель $SA3$ – в положении “2 сек”), после неоднократного нажатия кнопки $SB1$ “запуск” цикла преобразования по повторяемости выходного кода убедиться в стабильности работы АЦП.

3. Включить непрерывный режим без регулирования количества n разрядов (при $n = 12$, включенном $SA1$ и выключенном $SA2$) и проанализировать работу АЦП по осциллограммам $U_{ВЫХ}^{ЦАП}$ для напряжений $U_{ВХ} = 0$ и $U_{ВХ} > 10,24 В$ при периоде тактовой частоты ГТИ 2 мс ($SA3$ в положении 2 мс). Зарисовать осциллограммы $U_{ВЫХ}^{ЦАП}$ с экрана осциллографа. Отметить на осциллограммах уровни $U_{ВХ} = 0$ и $U_{ВХ} \geq 10,24 В$.

4. В непрерывном режиме с регулировкой количества n разрядов переключателем $SA4$ ($SA1$ - в безразличном, включенном или выключенном положении, $SA2$ - включен, в верхнем положении) для двух значений $U_{ВХ} = 0$ и $U_{ВХ} \geq 10,24 В$, двух заданных значений разрядов и при длительности такта ГТИ 2 мс ($SA3$ в положении 2 мс) зарисовать осциллограммы $U_{ВЫХ}^{ЦАП}$ с экрана осциллографа. Отметить на осциллограммах уровни $U_{ВХ} = 0$ и $U_{ВХ} \geq 10,24 В$. Сравнить полученные осциллограммы с расчетными для $U_{ВХ} = 0$ и $U_{ВХ} \geq 10,24 В$ и с осциллограммами п. 3.

5. В ждущем режиме (переключатели $SA1$ и $SA2$ выключены) при заданных в предварительном задании двух значениях разрядов n_1 и n_2 и длительности такта ГТИ 2 с определить значения кодов при $U_{ВХ} = 0$, $U_{ВХ} \geq 10,24 В$, а также при трех промежуточных значениях $U_{ВХ}$, находящихся, соответственно, в пределах: (0 ... 3) В; (3 ... 7) В; (7 ... 10,24) В. Проследить на осциллографе за изменениями уровня $U_{ВЫХ}^{ЦАП} = U_{ВЫХ}$ в процессе уравнивания всех значений $U_{ВХ}$, записав при этом в табл.8.4 значения $U_{ВХ.Э}$, код при разрядности n_1 , код при разрядности n_2 и $U_{ВЫХ}^{ЦАП}$ после уравнивания, зарегистрированные цифровым вольтметром.

ТАБЛИЦА 18.4

| Измерено | | | | Вычислено | | | |
|---------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|-----------------|--------|-----------------|--------|
| $U_{ВХ.Э}, В$ | код $U_{ВХ.Э}$ при n_1 | код $U_{ВХ.Э}$ при n_2 | $U_{ВЫХ}^{ЦАП}, В$ | $\gamma_{nАЦП}$ | | $\gamma_{nЦАП}$ | |
| | | | | $n_1=$ | $n_2=$ | $n_1=$ | $n_2=$ |
| 0 | | | | | | | |
| 10,24 | | | | | | | |
| U_1 | | | | | | | |
| U_2 | | | | | | | |
| U_3 | | | | | | | |

6. По полученным в п. 5 результатам определить расчетным путем для каждого из входных напряжений $U_{ВХ.Э}$ (кроме $U_{ВХ.Э} = 0$ и $U_{ВХ.Э} \geq 10,24$ В) при заданной разрядности n_1 и n_2 погрешность $\gamma_{нАЦП}$ преобразования $U_{ВХ.Э}$ в код и погрешность $\gamma_{нЦАП}$ преобразования кода напряжений $U_{ВХ.Э}$ в аналог ЦАП. Результаты расчетов внести в табл. 15.4. Как изменяются погрешности $\gamma_{нАЦП}$ и $\gamma_{нЦАП}$ с изменением значений $U_{ВХ.Э}$ и разрядности преобразования n ?

Содержание отчета

Цель работы; схема лабораторной установки (рис. 15.4); таблица результатов измерений и расчетов; расчетные и снятые экспериментально осциллограммы зависимости $U_{ВЫХ}^{ЦАП}$ в функции от тактов уравнивания напряжений $U_{ВХ} = 0$ и $U_{ВХ} \geq 10,24$ В при n_1 и n_2 разрядах преобразования.

Контрольные вопросы

1. Для каких целей применяется ЦАП и АЦП?
2. Какие функции выполняет РПП?
3. Как осуществляется процесс поразрядного уравнивания?
4. Как работает ЦАП параллельного преобразования?
5. Какие причины ограничивают разрядность ЦАП?
6. Почему в АЦП используется двоичная система счисления?
7. Как оценивается точность и разрешающая способность АЦП и ЦАП?
8. Как оценивается точность преобразования напряжений в код АЦП и точность преобразования входного кода в аналог ЦАП?

Лабораторная работа № 16

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И АВТОМАТИКИ

Цель работы: Изучение работы некоторых электронных элементов и узлов, конструирование на их основе устройств автоматики.

Общие сведения

В лабораторной работе рассматриваются следующие электронные элементы и узлы.

$\overline{R}\overline{S}$ - т р и г г е р на двух логических элементах 2И-НЕ (рис 19.1). Триггер имеет входы \overline{S} , \overline{R} и выходы Q (прямой) и \overline{Q} (инверсный), напряжение которых может иметь два уровня: низкий $U^0 = 0.1...0.4$ В (логический ноль) или высокий $U^1 = 2.5...5$ В (логическая 1).

Входы \overline{S} и \overline{R} обозначаются как инверсные в связи с тем, что для данного триггера управляющими являются сигналы низкого (нулевого) уровня.

При неизменных входных сигналах триггер находится в одном из двух устойчивых состояний: $Q = 1$ или $Q = 0$. Перевод триггера из одного состояния в другое производится подачей на входы \overline{S} или \overline{R} кратковременного нулевого сигнала: при $\overline{S} = 0$ триггер устанавливается в состояние $Q = 1$, при $\overline{R} = 0$ – переходит в состояние $Q = 0$. Комбинация $\overline{S} = 0$ и $\overline{R} = 0$ несущая противоречивые команды – «установить 1» и «установить 0» - является запрещенной (неопределенной). Триггер - это простейший элемент памяти, так как сохраняет информацию о последней из входных команд.

М у л ь т и в и б р а т о р на двух логических элементах (ЛЭ) 2И-НЕ (рис. 16.2) предназначен для выработки прямоугольных импульсов на выходе Q_2 при сигнале на входе $X_1 = 1$. Если $X_1 = 0$, то $Q_1 = 1$, $Q_2 = 0$, конденсатор C

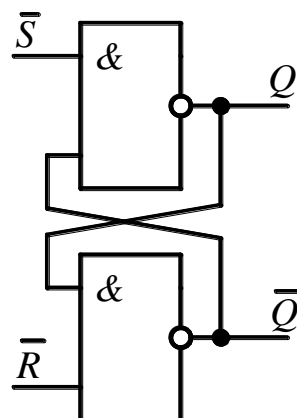


Рисунок 16.1
RS - триггер

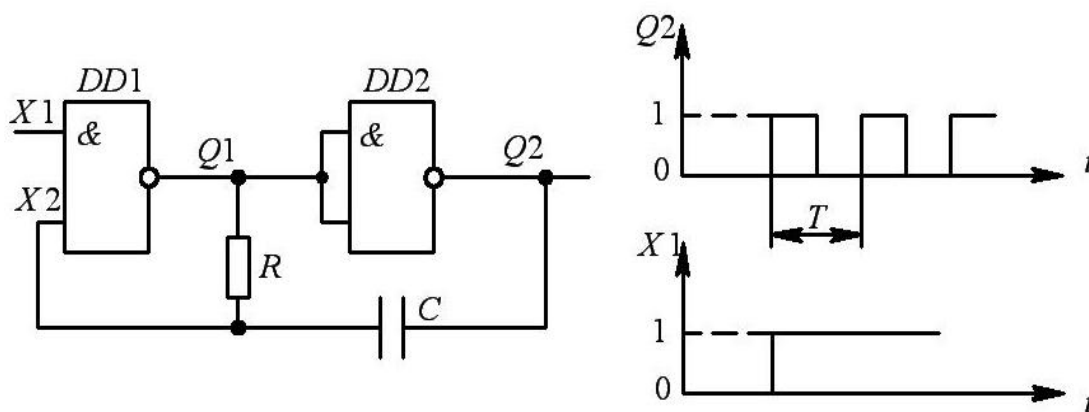


Рисунок 16.2 Мультивибратор

заряжен, и, поскольку вход X_2 соединен с конденсатором, $X_2 = 1$. Состояние схемы устойчиво, генерации импульсов нет.

При подаче сигнала $X_1 = 1$ сигналы на выходах ЛЭ изменятся на $Q_1 = 0$, $Q_2 = 1$; начнется перезаряд конденсатора C по цепи: выход $DD2$ – конденсатор C – резистор R – выход $DD1$. Напряжение на входе X_2 будет понижаться, и когда оно достигнет порогового значения (напряжения перехода ЛЭ из одного состояния в другое $U_{пор} = 1.3$ В), сигналы на выходах опять изменятся: $Q_1 = 1$, $Q_2 = 0$. Далее начинается новый перезаряд конденсатора C (по цепи выход $DD1$ – резистор R – конденсатор C – выход $DD2$), в результате которого напряжение на входе X_2 снова будет повышаться, и при $X_2 \geq U_{пор}$ произойдет новое переключение ЛЭ в противоположное состояние ($Q_1 = 0$, $Q_2 = 1$). Так работает генератор прямоугольных сигналов.

Тиристор – четырехслойный полупроводниковый прибор с тремя p - n -переходами. Тиристор обладает двумя устойчивыми состояниями: состояние низкой проводимости (тиристор закрыт) и состояние высокой проводимости (тиристор открыт). Перевод тиристора в открытое состояние осуществляется подачей на управляющий электрод положительного по отношению к катоду напряжения. Запирание тиристора осуществляется в цепях переменного тока или пульсирующего напряжения – при снижении тока ниже тока удержания, в цепях постоянного тока – за счет принудительной коммутации.

Тиристоры широко применяются в качестве коммутирующих бесконтактных элементов (например, в бесконтактных пускателях) и для регулирования в широких пределах напряжения на нагрузке за счет регулирования момента открывания тиристора.

Тиристорный оптрон имеет излучающий оптрон и фотоприемный элементы, между которыми осуществляется оптическая связь. В тиристорной оптопаре излучателем является светодиод инфракрасного излучения, а приемным элементом – кремниевый фототиристор. Фототиристор открывается при наличии напряжения между его анодом и катодом, как только происходит освещение светодиодом базы фототиристора. Включенное состояние фототиристора сохраняется и с прекращением излучения светодиодом при снятии входного напряжения. Чтобы запереть фототиристор, с него нужно снять внешнее анодное напряжение. Если фототиристор включен в цепь переменного или пульсирующего напряжения, его выключение происходит в каждый из периодов при снижении тока до значения ниже тока удержания (близкого к нулю).

Тиристорные оптроны целесообразно использовать для гальванической развязки цепей управления и более мощных (силовых) цепей, – например, для дистанционного управления двигателем, осветительными установками и т.д.

Блок счета и цифровой индикации числа импульсов (рис. 16.3) состоит из десятичного счетчика импульсов $CT10$, дешифратора DC , и цифрового газоразрядного индикатора $HG1$.

Рисунок 16.3. Блок счета и цифровой индикации числа импульсов

Десятичный счетчик *CT10* суммирует импульсы, поступившие на его вход *C*, и представляет их число (от 0 до 9) в двоичном коде 8-4-2-1. Каждый из этих выводов отображает разряд двоичного числа с соответствующим (8, 4, 2 или 1) числовым «весом», а комбинация сигналов (нулей и единиц) на выходах выражает в двоичной системе число импульсов. Например, комбинация 0110 («1» - на выходах 4 и 2, «0» - на выходах 8 и 1) означает, что на счетчик $4+2=6$ импульсов. Счет ведется до 10 импульсов; 10-й импульс устанавливает все выходы в исходное состояние – «0».

Дешифратор *DC* преобразует число в двоичном коде, поданное на его входы 8-4-2-1, в десятичное число – сигнал «0» на том из 10 выходов *DC*, номер которого соответствует поданному числу (на остальных 9 выходах будет сигнал «1»). Так, если на вход дешифратора поступает число 0101 (сигнал «1» на входах 4 и 1), то сигнал «0» появится на выходе 5, так как двоичному числу 0101 соответствует десятичное 5.

Цифровой газоразрядный индикатор *HG1* представляет собой стеклянный баллон, наполненный инертным газом, в который помещены 10 катодов, имеющих форму цифр от 1 до 9 и один сетчатый анод. При появлении на одном из катодов «нулевого» потенциала напряжение между анодом и заданным катодом оказывается достаточным для возникновения тлеющего разряда в газе, который высвечивает цифру, изображаемую катодом.

Бесконтактное управление асинхронным двигателем

Управление асинхронным двигателем с помощью контактной аппаратуры при большой частоте включения приводит к подгоранию и износу контактов. Бесконтактные тиристорные пускатели лишены этого недостатка, обладают большим быстродействием и обеспечивают надежную работу электропривода в целом.

На рис. 16.3 приведена схема тиристорного пускателя, силовая часть которого состоит из трех тиристорно-диодных элементов, включенных по встречно-параллельной схеме между сетью и статором асинхронного двигателя. Здесь тиристор и диод в каждой фазе является аналогом контакта контактора. Из сети в обмотку статора ток идет через диоды, а возвращается в сеть через тиристоры, обеспечивая тем самым протекание по статорной обмотке трехфазного переменного тока. Управление силовыми тиристорами *VS1...VS3* осуществляется трехфазным диодным мостом, в плечи которого *V4...V6* включены управляющие переходы силовых тиристоров. Между выходными зажимами трехфазного диодного моста включен вспомогательный тиристор *VS4*, который включается от кнопки *SB7* «Пуск» или от контакта реле *K*. Тиристор *VS4* поддерживается в открытом состоянии своим анодным током. Управляющие сигналы от *VS4* через *V4...V6* открывают тот силовой тиристор, катод которого в этот момент имеет наиболее отрицательный потенциал.

Схема позволяет осуществлять два режима дистанционного управления двигателем с помощью реле *K*. Если тумблер *SA4* стоит в положении «Режим 1», реле *K* своим замыкающим контактом запускает двигатель (остановка –

кнопкой *SB6* «Стоп»); если тумблер *SA4* стоит в положении «Режим 2», двигатель запускается кнопкой *SB7* «Пуск», а отключается размыкающим контактом реле *K* (например, под воздействием каких-то внешних защитных блокировок). Аварийное отключение двигателя в любом режиме осуществляется кнопкой *SB6* «Стоп».

Предварительное задание к эксперименту

В зависимости от варианта выполнить задание, указанное в табл. 16.1

ТАБЛИЦА 16.1

| Вариант | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Номер задания | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |

Задание 1

Начертить схему и объяснить работу реле времени на элементах *DD1...DD4* (рис. 19.3), используя приведенные схемы электронных узлов, которые необходимо дополнить электрическими связями между контактными гнездами *X1-X2*, *X3-X4*, *X5-X6*.

Задание 2

Начертить и объяснить работу схемы устройства автоматического отключения электрической лампы (*HL6*) через заданный интервал времени. Для этого использовать показанные на рис. 19.3 схемы электронных элементов *DD1...DD4*, *VT*, которые должны быть дополнены электрическими связями между контактными гнездами *X1-X2*, *X3-X4*, *X5-X6*, *X1-X11*, *X14-X16*.

Задание 3

Начертить схему и объяснить принцип работы автоматического управления наружным электроосвещением (лампа *HL7*). Для этого использовать показанные на рис. 19.3 фоторезистор *R_F*, транзистор *VT*, узел управления лампой *HL7* через однофазный мост *UZ*, тиристор *VS* и оптрон *VU*. Для получения схемы устройства необходимо выполнить электрические связи между этими элементами, соединив контактные гнезда *X8-X11*, *X12-X13*, *X7-X14*.

Пояснение. При достаточной освещенности фоторезистора его сопротивление резко снижается, открывается транзистор, который шунтирует входную цепь оптрона, что приведет к разрыву его входной цепи и погасанию лампы *HL7*.

Задание 4

Начертить и объяснить работу схемы бесконтактного управления асинхронным двигателем (рис. 16.3).

Порядок выполнения эксперимента

Испытание электронных элементов и узлов

1. Опробовать работу \overline{RS} -триггера на элементах $DD1.1$ - $DD1.2$, переключая его кнопками $SB1$, $SB2$ и наблюдая за светодиодом $HL1$. Составить таблицу истинности.
2. Испытать работу мультивибратора, собранного на элементах $DD1.3$ - $DD1.4$. Для этого соединить выход $X1$ элемента $DD1.1$ с входом $X2$ элемента $DD1.3$. Запустить мультивибратор кнопкой $SB1$, наблюдать за миганием светодиода $HL3$, а при включении кнопки $SB3$ – за «перемигиванием» $HL2$ - $HL3$. Убедиться, что частота импульсов мультивибратора уменьшается при возрастании емкости C (для этого подключить тумблером $SA1$ параллельно емкости $C1$ емкость $C2$). Остановить мультивибратор кнопкой $SB2$. Вычислить частоту (число импульсов в одну секунду) при емкостях $C1$ и $C1+C2$.
3. Испытать работу десятичного счетчика $DD2$ в качестве делителя частоты, соединив выход $X3$ мультивибратора с входом «C» ($X4$) счетчика $DD2$. Наблюдая за частотой импульсов на входе счетчика с помощью светодиода $HL3$ и газоразрядного индикатора $HG1$, убедиться, что на выходе счетчика (вывод «8» $DD2$, светодиод $HL4$) частота импульсов в 10 раз меньше, чем на входе (на каждые 10 входных импульсов – индикаторы $HL3$, $HG1$ – получаем 1 выходной импульс $HL4$).
4. Собрать и испытать схему реле времени на элементах $DD1...DD4$, соединив контактные гнезда $X1$ - $X2$, $X3$ - $X4$, $X5$ - $X6$. Кнопкой $SB1$ включить светодиод $HL1$, который должен погаснуть после отсчета десяти импульсов $HL3$ ($HG1$). Измерить и записать выдержку реле времени для двух значений емкости ($C1$ и $C1+C2$).
5. Испытать работу транзистора VT . Соединить вывод $X10$ кнопки $SB4$ с выводом $X11$ базы транзистора, вывод коллектора $X14$ – с выводом $X16$ лампы $HL6$. При нажатии кнопки $SB4$ транзистор VT открывается, и лампа $HL6$ загорается.
6. Испытать работу тиристора VS . Включить тумблер $SA3$, тогда при нажатии кнопки $SB5$, падающей напряжение на управляющий электрод тиристора, тиристор VS открывается, и лампа $HL7$ загорается.
7. Испытать работу оптрона VU . Соединить вывод $X10$ кнопки $SB4$ с входом $X7$ оптрона VU . При нажатии кнопки $SB4$ срабатывает оптрон VU , тиристор VS открывается, и лампа $HL7$ загорается.

Сборка и испытание устройств автоматики

1. Устройство автоматического отключения через заданный интервал времени электрической лампы, например, в подъезде жилого дома. Собрать схему устройства, соединив контактные гнезда $X1$ - $X2$, $X3$ - $X4$, $X5$ - $X6$, $X1$ - $X11$, $X14$ - $X16$. При нажатии кнопки $SB1$ загорается лампа «коридорного освещения» $HL6$ и будет гореть, пока реле времени (индикация по $HG1$) отсчитывает выдержку от 0 до 10. Выдержка реле времени (частота импульсов мультивибратора) может изменяться с помощью тумблера $SA1$.

2. Устройство автоматического управления электрической лампой в функции освещенности, например, управления наружным электроосвещением. Собрать схему устройства, соединив контактные гнезда $X8-X11$, $X12-X13$, $X7-X14$. Включить тумблеры $SA2$ и $SA3$. При повороте зеркальца, прикрывающего фоторезистор, под таким углом, чтобы световой поток лампы $HL5$ падал на фоторезистор R_F (имитация наступления рассвета), лампа $HL7$ (наружное освещение) погасает. Это обусловлено тем, что при наступлении «рассвета» сопротивление фоторезистора R_F резко понижается и шунтирует светодиод оптрона VU ; оптрон разрывает свою выходную цепь.

3. Устройство управления мигающим светодомом. Соединить контактные гнезда $X1-X2$, $X3-X11$, $X14-X16$. При нажатии кнопки $SB1$ лампа $HL6$ горит «мигающим светом», частоту которого можно изменять частотой импульсов мультивибратора (тумблером $SA1$).

4. Управление асинхронным двигателем с помощью бесконтактного тиристорного пускателя. Включить трехполосный автомат на питающем щитке. При нажатии кнопки $SB7$ «Пуск» открывается тиристор $VS4$, который в свою очередь, открывает тиристоры $VS1...VS3$ бесконтактного пускателя; двигатель запускается.

5. Включение асинхронного двигателя в функции освещенности, например, автоматическое включение вентилятора в цехе с наступлением дня. Собрать схему, соединив контактные гнезда $X8-X11$, $X14-X15$. Фоторезистор R_F прикрыть зеркальцем, включить лампу $HL5$ тумблером $SA2$. При открывании зеркальца часть светового потока лампы $HL5$ падает на фоторезистор R_F (имитация наступления дня), что приводит к срабатыванию реле K , которое включает бесконтактный пускатель; двигатель запускается.

Содержание отчета

Цель работы; схема автоматического устройства, заданного в предварительном задании; описание работы этой схемы; результаты испытаний электронных элементов и узлов в соответствии с указаниями в разделе «Порядок выполнения эксперимента».

Контрольные вопросы

1. Какую из кнопок $SB1$ и $SB2$ (рис. 16.3) нужно замкнуть, чтобы загорелся светодиод $HL1$? Как погасить $HL1$? Ответ обосновать.

2. Для чего предназначен мультивибратор? От чего и как зависит частота вырабатываемых мультивибратором импульсов?

3. Какое число импульсов поступило на вход десятичного счетчика $CT10$ (рис. 16.3), если на его выходах 1 и 4 имеется «логическая 1», а на выходах 2 и 8 – «логический 0»?

4. Какая цифра будет светиться на газоразрядной индикаторной лампе $HG1$, катоды которой подключены к дешифратору DC (рис. 19.3), если на входы 1 и 4 дешифратора DC подана «логическая 1», а на входы 2 и 8 – «логический 0»?

5. В каком состоянии (горит или погашена) будет лампа *HL7* (рис. 16.3), если тумблер *SA3* замкнут, а тиристор *VS*: а) открыт; б) заперт?
6. Как воздействовать на оптрон *VU* (рис. 16.3), чтобы открылся тиристор *VS*?
7. Почему в каждую фазу силовой цепи двигателя *M* (рис. 16.3) параллельно тиристорам включены диоды во встречном направлении?

КОНТРОЛЬ ЗНАНИЙ

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ ПО КУРСУ «ЭЛЕКТРОНИКА»

1. Электропроводность полупроводников. Беспримесные и примесные полупроводники.
2. Образование электронно-дырочного перехода.
3. Физические процессы в $p-n$ переходе. ВАХ. Электрический и тепловой пробой перехода.
4. Полупроводниковые резисторы, диоды, стабилитроны.
5. Биполярные транзисторы. Устройство и усилительные свойства. Схемы включения транзистора.
6. Схема включения биполярного транзистора с ОЭ. Входные и выходные характеристики, h -параметры.
7. Полевые транзисторы с $p-n$ -переходом, с изолированным затвором (МДП-транзисторы); их вольтамперные характеристики и параметры.
8. Тиристоры. Определение. Классификация. Физические процессы в динисторе и тиристоре. ВАХ и основные параметры тиристоров.
9. Интегральные микросхемы. Классификация ИМС. Основные параметры ИМС.
10. Однофазный однополупериодный выпрямитель. Схема. Принцип действия. Основные соотношения.
11. Однофазный двухполупериодный (мостовой) выпрямитель. Схема. Принцип действия. Основные соотношения.
12. Трехфазный мостовой выпрямитель. Схема. Принцип действия. Основные соотношения.
13. Управляемый выпрямитель. Схема. Принцип действия. Основные соотношения.
14. Сглаживающие фильтры, назначение, типы, расчет фильтра.
15. Параметрический стабилизатор напряжения. Схема. Принцип действия.
16. Компенсационный стабилизатор напряжения. Схема. Принцип действия.
17. Элементы оптоэлектроники. Преимущества оптоэлектронных приборов. Условные изображения, структура, принцип работы фоторезисторов, фотодиодов, фототранзисторов, светодиодов. Области их применения.
18. Усилители. Общие сведения. Классификация. Принцип построения усилительных каскадов. Режим покоя.
19. Усилительный каскад на биполярном транзисторе с ОЭ. Назначение элементов схемы. Принцип работы, временная диаграмма. Статический и динамический режимы.
20. Операционные усилители. Амплитудная характеристика. Структурная схема, обозначение, общие свойства.

21. Основные аналоговые схемы на основе ОУ (инвертирующий и неинвертирующий ОУ, сумматоры, вычитатель, интегратор, дифференциатор).
22. Генератор гармонических колебаний с мостом Вина. Мультивибратор.
23. Компаратор. Триггер Шмидта.
24. Основы алгебры логики. Аксиомы, законы, тождества, теоремы алгебры логики.
25. Логические функции. Логические элементы. Базовый логический элемент.
26. Комбинационные логические устройства. Устройство, принцип работы и назначение шифратора, дешифратора, мультиплексора и сумматора.
27. Триггеры. Основные определения и назначение. Классификация триггеров. Принцип работы асинхронного RS - триггера с прямыми входами. Временные диаграммы. Таблица истинности.
28. Принцип работы асинхронного RS - триггера с инверсными входами. Временные диаграммы. Таблицы истинности.
29. Принцип работы синхронного RS - триггера с прямыми входами. Временные диаграммы. Таблицы истинности.
30. Принцип работы D - триггера. Временные диаграммы. Таблицы истинности.
31. Принцип работы JK - триггера. Временные диаграммы. Таблицы истинности.
32. Принцип работы T - триггера. Временные диаграммы. Таблицы истинности.
33. Счетчики на JK триггерах. Последовательные и параллельные. Принцип построения и работы. Временные диаграммы.
34. Счетчики на D триггерах. Последовательные. С произвольным коэффициентом деления.
35. Параллельные и последовательные регистры. Принцип построения. Назначение и применение.
36. Цифро-аналоговые преобразователи. Принцип работы схем.
37. Аналого-цифровые преобразователи. Принцип работы схем

ВОПРОСЫ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

[I Контрольные задачи и тестовые задания по теме «Выпрямители»](#)

[II Контрольные задачи и тестовые задания по теме «Усилители»](#)

[III Контрольные задачи и тестовые задания по теме «Операционные усилители»](#)

[IV Контрольные задачи и тестовые задания по теме «Цифровые устройства»](#)

I

Контрольные задачи по теме «Выпрямители»

Задача В1. На вход выпрямителя (рис. 1) подано напряжение $u_1 = U_m \sin \omega t$.

Число витков вторичных полуобмоток трансформатора $w_1 = w_2$.

Начертить временные диаграммы напряжения на нагрузке при включении ее между выводами а) 1 - 2; б) 1 - 3; в) 2 - 3.

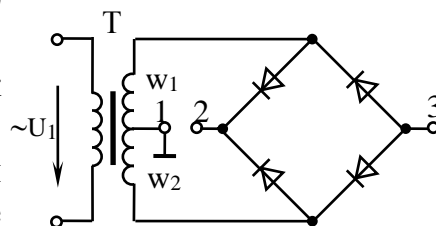


Рис. 1

Задача В1 При прямом напряжении 0,9 В максимально допустимый ток диода равен 300 мА.

Каково наибольшее напряжение источника, при котором диод будет работать в безопасном режиме, если этот диод соединить последовательно с резистором $R_n = 17 \text{ Ом}$?

Задача В3. В цепи (рис. 2) через нагрузочный резистор $R_n = 500 \text{ Ом}$ протекает ток $I_n = 0,1 \text{ А}$.

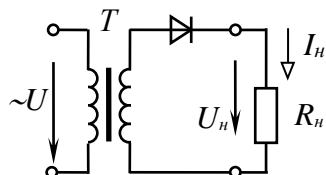


Рис. 2

Выбрать тип диода и рассчитать коэффициент трансформации и мощность трансформатора, если напряжение питающей сети $U_1 = 220 \text{ В}$.

Задача В4 Аккумуляторная батарея, ЭДС которой $E = 12 \text{ В}$, внутреннее сопротивление $R_0 = 1 \text{ Ом}$, заряжается через однофазный мостовой выпрямитель, подключенный к трансформатору с вторичным напряжением $u_2 = 22 \sin \omega t, \text{ В}$. Начертить электрическую схему зарядной установки и определить среднее значение зарядного тока.

Задача В5. Определить параметры Г-образного LC-фильтра к однополупериодному выпрямителю, если коэффициент пульсации напряжения нагрузки $K_{П2} = 0,02$, частота питающей сети $f = 50 \text{ Гц}$.

Задача В6 Определить угол управления однофазного мостового управляемого выпрямителя на тиристорах, если среднее значение напряжения на нагрузке должно быть равным а) 10 В; б) 1,75 В. Напряжение вторичной обмотки трансформатора, к которому подключен выпрямитель, $U_2 = 13 \text{ В}$.

Задача В67. Определить коэффициент полезного действия стабилизатора на полупроводниковом стабилизаторе, у которого напряжение стабилизации $U_{ст} = 5$ В при токе стабилизации $I_{ст} = 0,5$ А, если $R_H = 10$ Ом ; $R_6 = 5$ Ом.

Ответы к контрольным задачам

В1 $R_{пр} = 16$ Ом; $R_{обр} = 5$ МОм.; В2. 6 В.; В3 Д210; $n = 2$; $P_T = 15$ Вт.;
В4. 2 А.; В5. $C_\phi = 200$ мкФ; $L_\phi = 3,92$ Гн.; В6. а) 45° ; б) 135° . В7. 0,25.

Тест по теме «Выпрямители» для компьютерного или аудиторного контроля знаний студентов

1. В схеме однополупериодного выпрямителя на нагрузке $R_H = 510$ Ом постоянное напряжение $U_H = 100$ В. Правильно ли выбран диод Д226, для которого максимальное обратное напряжение $U_{обр} = 400$ В, а наибольший выпрямленный ток $I_0 = 300$ мА?

2. В схеме двухполупериодного выпрямителя через нагрузку проходит постоянный ток $I_H = 600$ мА. Можно ли в схеме использовать диоды типа Д229В, у которых наибольший средний прямой ток не более 400 мА?

3. Определить частоту пульсации основной гармоники напряжения на нагрузке трехфазного мостового выпрямителя, если напряжение первичной обмотки трансформатора имеет частоту $f_C = 400$ Гц?

4. Определить действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора в схеме двухполупериодного мостового выпрямителя, если через каждый диод идет ток $I_0 = 150$ мА, а сопротивление нагрузки $R_H = 430$ Ом.

5. В схему двухполупериодного выпрямителя включен индуктивный сглаживающий фильтр. Определить индуктивность дросселя, если выпрямленный ток $I_H = 1$ А, выпрямленное напряжение $U_H = 100$ В, частота сети $f_C = 400$ Гц, коэффициент сглаживания $k_{сгл} = 15$.

II

Контрольные задачи по теме «Усилители»

Задача У1. В биполярном транзисторе $I_K = 10 \text{ мА}$, $I_Э = 10,5 \text{ мА}$.

Определить коэффициенты передачи тока α и β , если тепловым током можно пренебречь.

Задача У2 Биполярный транзистор с $\beta = 100$ имеет $I_B = 10 \text{ мкА}$.

Определить I_K и $I_Э$, если тепловым током можно пренебречь. Сравнить токи I_K и $I_Э$.

Задача У3. Усилитель имеет $K_U = 100$. Он охвачен положительной обратной связью по напряжению с коэффициентом передачи $\beta = 0,01$.

Определить коэффициент усиления усилителя с обратной связью.

Задача У4. Усилитель имеет следующие динамические параметры:
 $K_U = 250$, $R_{ВХ} = 0,5 \text{ кОм}$, $R_{ВЫХ} = 1 \text{ кОм}$.

Рассчитать коэффициент передачи цепи обратной связи β , которая позволит повысить входное сопротивление до 2 кОм .

Определить параметры усилителя с учетом ООС.

Задача У5. Двухкаскадный усилитель с коэффициентами усиления каскадов $K_{U1} = 100$ и $K_{U2} = 20$ охвачен общей отрицательной обратной связью по напряжению с $\beta = 0,02$.

Определить общий коэффициент усиления с учетом ООС.

Задача У6. $K_{OC} = 48,8$; $14,31$. $P_{И} = P_K \geq 1 \text{ Вт}$. Рассчитать мощность источника питания и максимальную мощность P_K транзистора одноконтурного трансформаторного каскада усиления мощности, если $P_{H \max} = 0,5 \text{ Вт}$.

Задача У7. Какую максимальную мощность можно получить от двухконтурного каскада усиления мощности, если транзисторы работают в классе В и имеют $P_{K \text{ доп}} = 0,6 \text{ Вт}$?

Ответы к контрольным задачам

У1. $\alpha = 0,95$; $\beta = 20$; У2. $I_K = 1 \text{ мА}$; $I_Э = 0,05 \text{ мА}$; $14,28$. $K_{OC} \rightarrow \infty$

У3. $\beta = 0,012$; $K_{OC} = 62,5$; $R_{ВХ} = 2 \text{ кОм}$; $R_{ВЫХ} = 0,25 \text{ кОм}$.

У4. $K_{OC} = 48,8$; У5. $P_{И} = P_K \geq 1 \text{ Вт}$; У6. $P_{И} = P_K \geq 1 \text{ Вт}$;

У7. При $\eta = 0,7$ $P_H = 2,8 \text{ Вт}$.

**Тест по теме «Усилители» для компьютерного или аудиторного
контроля знаний студентов**

Для транзистора ГТ109А коэффициент передачи тока эмиттера $h_{21Б} = 0,95 \dots 0,98$. Определить в каких пределах может изменяться коэффициент усиления тока базы.

Для транзистора КТ312А статический коэффициент усиления тока базы $h_{21Э} = 10 \dots 100$. Определить, в каких пределах может изменяться коэффициент передачи тока эмиттера $h_{21Б}$.

Биполярный транзистор, имеющий коэффициент передачи тока базы $\beta = 100$, включен по схеме с общим эмиттером. Определить ток базы $I_Б$, ток эмиттера $I_Э$, коэффициент передачи тока эмиттера α , если ток коллектора $I_К = 1$ мА, а током $I_{К0}$ можно пренебречь.

Усилитель имеет следующие динамические параметры: $k_U = 100$, $R_{вх} = 1$ кОм, $R_{вых} = 10$ кОм. Рассчитать коэффициент передачи цепи обратной связи β , которая позволит повысить входное сопротивление до 5 кОм.

Определить параметры усилителя с учетом ООС.

Двухкаскадный усилитель с коэффициентами усиления каскадов $K_{U1} = 50$ и $K_{U2} = 60$ охвачен общей отрицательной обратной связью по напряжению с $\beta = 0,01$. Определить общий коэффициент усиления с учетом ООС.

III

Контрольные задачи по теме «Операционные усилители»

Задача ОУ1. В цепи рис. 1

$$R_1 = 20 \text{ кОм}; R_2 = 10 \text{ кОм};$$

$$R_3 = 25 \text{ кОм}; R_{oc} = 100 \text{ кОм};$$

$$U_1 = U_2 = U_3 = 10 \text{ мВ}.$$

Определить $U_{\text{вых}}$ и R_4 .

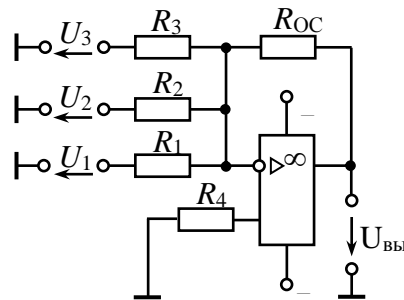


Рис. 1

Задача ОУ2. В цепи рис. 2 $R_1 = 5 \text{ кОм}$; $U_{\text{вх}} = 10 \text{ мВ}$;

$$U_{\text{вых}} = 0,11 \text{ В}.$$

Определить R_{oc} и R_2 .

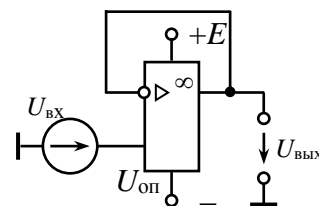


Рис. 2

Задача ОУ3. В цепи рис. 12 $U_{\text{вх}} = 1 \text{ В}$.
Определить $U_{\text{вых}}$.

Задача ОУ4. В цепь инвертирующего входа ОУ включен фотодиод VD. При некоторой освещенности ток фотодиода $I_{\phi} = 10 \text{ мкА}$. Рассчитать R_{oc} , при котором выходное напряжение $U_{\text{вых}} = 1 \text{ В}$.

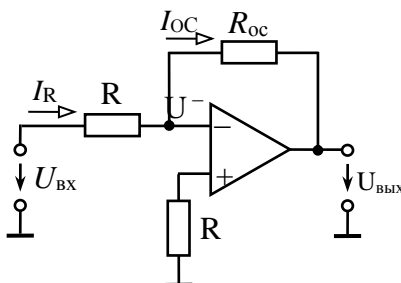
Ответы к контрольным задачам

ОУ1. $U_{\text{вых}} = -190 \text{ мВ}$; $R_4 = 5 \text{ кОм}$; ОУ2. $R_{oc} = 50 \text{ кОм}$; $R_2 = 4,55 \text{ кОм}$.

ОУ3. $U_{\text{вых}} = 1 \text{ В}$; ОУ4. $R_{oc} = 100 \text{ кОм}$.

Тест по теме «Операционные усилители» для компьютерного или аудиторного контроля знаний студентов

Найдите напряжение на выходе усилителя $U_{\text{вых}}$ и ток I_{oc} , если $U_{\text{вх}} = 0,1 \text{ В}$; $R = 1 \text{ кОм}$; $R_{oc} = 50 \text{ кОм}$? Питание ОУ осуществляется от двух источников напряжения: $U_{\text{ип1}} = +10 \text{ В}$ и $U_{\text{ип2}} = -10 \text{ В}$.



Составьте устройство на базе операционного усилителя для реализации функции

$$U_{\text{вых}} = -K_U \cdot (U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}} + U_{\text{вх3}})$$

Определить параметры схемы, если известны $R_{oc} = 20 \text{ кОм}$; $K_U = 5$.

Ограничится ли выходной сигнал в инвертирующем усилителе, если $U_{\text{вх}} = 1 \text{ В}$; $R_1 = 1 \text{ кОм}$; $R_{\text{ос}} = 20 \text{ кОм}$? Максимальное значение выходного напряжения ОУ $U_{\text{вых max}} = 15 \text{ В}$.

В каком режиме работает ОУ?

Составьте устройство на базе операционного усилителя для реализации функции

$$U_{\text{вых}} = -2 \cdot U_{\text{вх1}} - 3 U_{\text{вх2}} + U_{\text{вх3}}.$$

Определить параметры схемы, если $R_{\text{ос}} = 20 \text{ кОм}$.

Для разностного усилителя определить величину $U_{\text{вых}}$, если $U_{\text{вх1}} = 0,2 \text{ В}$; $U_{\text{вх2}} = -0,2 \text{ В}$; $R_1 = R_2 = R_{\text{ос}} = R_3 = 20 \text{ кОм}$.

IV

Контрольные задачи по теме «Цифровые устройства»

Задача ЦУ1. Определить период T , длительность импульса $t_{\text{и}}$ и паузы $t_{\text{п}}$, если частота следования импульсов $f = 10 \text{ кГц}$, а скважность $Q = 10$.

Задача ЦУ2. Составить таблицы истинности для функций, реализуемых логическими элементами 2И-НЕ, 3ИЛИ-НЕ. Начертить условное обозначение этих элементов.

Задача ЦУ3. Составить функциональную схему устройства на логических элементах, реализующего функцию а) $F_1 = \bar{X}_1 + X_2 + \bar{X}_3$; б) $F_2 = X_1 \cdot X_2 + X_3$.

Задача ЦУ4. Составить функциональную схему устройства, реализующего логические функции $F_1 = \bar{X}$; $F_2 = X_1 + X_2$; $F_3 = X_1 \cdot X_2$ на логических элементах а) 2И-НЕ; б) 2ИЛИ-НЕ.

Задача 16.22. Составить функциональную схему на логических элементах 2И-НЕ, реализующую функцию $F = X_1 \cdot X_2 + \bar{X}_3 \cdot X_4$.

Задача ЦУ5. На рис. 1 приведена структурная схема логического устройства. Запишите уравнение логической функции, реализуемой этим устройством. При каком наборе входных сигналов $F = 1$?

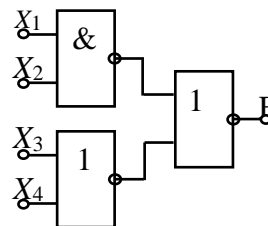


Рис. 1

Задача ЦУ6. Записать функцию и составить схему, реализующую мажоритарную логику (на выходе появляется 1, если на всех трех или на любых двух входах имеется 1).

Задача ЦУ7. Составить схему шифратора для преобразования числа из восьмеричного кода в двоичный.

Задача ЦУ8. Составить схему дешифратора для перевода числа из двоичного кода в восьмеричный.

Задача ЦУ9. Составить схему мультиплексора для передачи информации от трех источников по одной линии.

Задача ЦУ10. Используя схемы мультиплексора и демультиплексора, составить схему передачи информации от трех источников трем приемникам по одной линии связи.

Задача ЦУ11. Составить таблицу состояний для RS – триггера на элементах И-НЕ. Начертить условное обозначение такого триггера.

Задача ЦУ12. Какой сигнал установится на выходах Q и \bar{Q} JK -триггера, если к приходу синхроимпульса а) $J = 1; K = 0$; б) $K = 1; J = 0$; в) $K = 1; J = 1$?

Задача ЦУ13. Составить схему T -триггера на основе JK -триггера, привести временные диаграммы его работы.

Задача ЦУ14. Составить схему последовательного суммирующего счетчика импульсов на D -триггерах с модулем счета $K = 8$. Начертить временные диаграммы его работы.

Задача ЦУ15. Составить схему последовательного суммирующего счетчика импульсов на JK -триггерах с модулем счета $K = 5$. Начертить временные диаграммы его работы. Каково состояние выходов счетчика после прихода трех импульсов?

Ответы к контрольным задачам

ЦУ1. $T = 0,1$ мс; $t_{\text{и}} = 0,01$ мс; $t_{\text{п}} = 0,09$ мс.

ЦУ5. $X_1 = X_3 = X_4 = 1$; $X_2 = X_3 = X_4 = 1$.

ЦУ6. $Y = X_1 X_2 + X_2 X_3 + X_1 X_3$

ЦУ11. а) $Q = 1$; $\bar{Q} = 0$;

б) $Q = 0$; $\bar{Q} = 1$;

в) $Q_{n+1} = \bar{Q}_n$.

ЦУ15. $Q_3 Q_2 Q_1 = 011$.

Тест по теме «Цифровые устройства» для компьютерного или аудиторного контроля знаний студентов

Преобразуйте логическую функцию для реализации на элементах 2И-НЕ. Изобразите схему на заданных элементах.

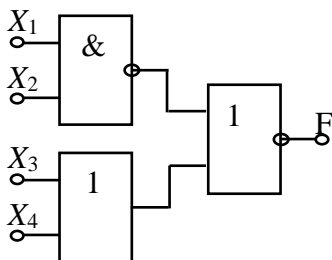
$$F = (\overline{X_1} + \overline{X_2} + X_3) + (X_3 + X_4) + (\overline{X_6} + X_7)$$

Используя логические элементы 3И, НЕ, составить комбинационную схему, вырабатывающую на выходе сигнал «1», только при поступлении на ее входы заданной комбинации входных сигналов 0101001. Запишите логическую функцию, отражающую работу устройства.

Преобразуйте логическую функцию для реализации на элементах 2ИЛИ, 2И, НЕ. Изобразите схему на заданных элементах.

$$F = \overline{X_1 \cdot \overline{X_2} \cdot X_3 \cdot X_4 + \overline{X_5} \cdot \overline{X_6} \cdot X_7}$$

Записать уравнение функции, которую реализует данная схема. При каких сочетаниях входных сигналов $F = 1$?



Составить функциональную схему на логических элементах 2И-НЕ, реализующую функцию $F = X_1 \cdot \overline{X_2} + \overline{X_1} \cdot X_2$.

ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЙ РАЗДЕЛ

Для изучения дисциплины «Электроника» студентами специальности 1-53 01 05 Автоматизированные электроприводы, согласно с утвержденной рабочей программе, предусмотрено 34 часа лекционных занятий и 34 часа лабораторных занятий. Ниже представлены разделы учебной программы: содержание учебного материала, учебно–методическая карта дисциплины, список рекомендуемой литературы.

СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

Содержание лекционных занятий

| № п. п. | Наименование тем и содержание занятий |
|---------|---|
| 2.1 | <p>ЭЛЕКТРОНИКА.</p> <p>Полупроводниковые приборы. Роль и задачи промышленной электроники как технической основы автоматизации. Полупроводниковые материалы (ПМ). Собственная и примесная электропроводность ПМ. Донорные и акцепторные примеси. Электронно-дырочный переход: образование, физические процессы, прямое и обратное смещение перехода, ВАХ, тепловой и электрический пробой. Переход металл-полупроводник.</p> <p>Полупроводниковые резисторы: варисторы, термо-, фоторезисторы. Диоды: СВЧ, выпрямительные, импульсные, стабилитроны, варикапы, туннельные, обращенные, свето-, фотодиоды.</p> <p>Биполярные транзисторы. Устройство, схемы включения с ОБ, ОЭ, ОК. Основные характеристики и h-параметры.</p> <p>Полевые транзисторы (ПТ). ПТ с управляющим p-n-переходом. Устройство, основные характеристики для схемы включения с ОИ. ПТ с изолированным затвором и встроенным или индуцированным каналом (МДП или МОП-транзисторы). Стоковые и стоко-затворные характеристики, основные параметры.</p> <p>Тиристоры: динистры, тринисторы, симисторы, одно- и двухоперационные, их устройство, принцип работы, ВАХ, области применения. Оптроны. ИМС: полупроводниковые и гибридные, аналоговые и цифровые. Маркировка и обозначение ИМС.</p> |

| | |
|-----|--|
| 2.2 | <p>Неуправляемые выпрямители</p> <p>Структурная схема неуправляемого выпрямителя. Однофазные выпрямители малой и средней мощности: однополупериодный, двухполупериодный с выводом средней точки трансформатора, мостовой. Трехфазные выпрямители: нулевой, мостовой. Коэффициент пульсаций. Внешняя характеристика. Расчет выпрямителей: выбор схемы выпрямителя, типа вентиля, мощности и коэффициента трансформации трансформатора.</p> <p>Фильтры (C, L, LC, RC), понятие о пассивных и активных фильтрах, коэффициент сглаживания фильтра, расчет параметров фильтра.</p> <p>Стабилизаторы напряжения и тока: параметрические и компенсационные, их параметры и характеристики.</p> |
| 2.3 | <p>Управляемые выпрямители. Однофазные и трехфазные управляемые выпрямители с активной и активно-индуктивной нагрузкой. Регулировочные и внешние характеристики.</p> |
| 2.4 | <p>Электронные усилители. Однокаскадный усилитель на биполярном транзисторе с ОЭ. Принцип действия, назначение элементов схемы. Статический и динамический режимы каскада, графический и аналитический расчет. Стабилизация рабочей точки. Амплитудная и амплитудно-частотная характеристики.</p> <p>Понятие о многокаскадных усилителях, межкаскадные связи, параметры и характеристики. Обратные связи в усилителях. Режимы работы усилительных каскадов (классы усиления). Однотактные и двухтактные усилители мощности.</p> <p>Усилители постоянного тока (УПТ), общая характеристика и их особенности. Дифференциальные каскады. Операционные усилители (ОУ): структурная схема, обозначение, основные параметры, общие свойства, амплитудная характеристика.</p> <p>Использование ОУ для построения аналоговых схем: инвертирующий и неинвертирующий усилитель, сумматор, вычитатель, интегратор, дифференциатор. Избирательные усилители (активные полосовые фильтры).</p> |
| 2.5 | <p>Импульсные и генераторные устройства. Импульсные устройства. Преимущества импульсного режима перед непрерывным. Передача непрерывного сигнала в виде прямоугольных импульсов. Ключевой режим работы транзистора. Импульсный (нелинейный) режим работы ОУ. Мультивибраторы на ОУ. Генератор гармонических колебаний с мостом Вина.</p> |

| | |
|-----|---|
| 2.6 | <p>Логические, комбинационные устройства и триггеры. Основные логические операции и их реализация на базе ИМС. Логические элементы ИЛИ, И, НЕ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ, их микросхемная реализация (ТТЛ и КМОП). Таблицы истинности, логические функции.</p> <p>Основные законы и тождества алгебры логики. Комбинационные логические устройства, синтез их в заданном логическом базисе. Комбинационные интегральные микросхемы: дешифратор, сумматор.</p> <p>Триггеры: общие понятия, назначение входов и выходов, асинхронные и синхронные, с динамическим и статическим управлением, однотактные и двухтактные. Структурные схемы асинхронного и синхронного RS-триггеров на ЛЭ 2И-НЕ и 2ИЛИ-НЕ, переключающие функции, таблицы переходов и временные диаграммы, условные обозначения. Реализация D-триггера на ЛЭ 2И-НЕ, работа его на примере таблицы переходов и временные диаграммы. Т-триггер, JK-триггер.</p> |
| 2.7 | <p>Микропроцессорная техника. Цифровые счетчики: последовательные, параллельные, суммирующие, вычитающие, реверсивные. Построение последовательных счетчиков с произвольным коэффициентом счета на T-триггерах.</p> <p>Регистры памяти и сдвига. Последовательные и параллельные регистры. Элементы памяти. Оперативное запоминающее устройство. Счетчики двоичные и с произвольным коэффициентом счета. Простые (суммирующие и вычитающие) и реверсивные счетчики.</p> <p>Цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи.</p> |

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА ДИСЦИПЛИНЫ

| Номер раздела, темы, занятия | Название раздела, темы, занятия; перечень изучаемых вопросов | Количество аудиторных часов | | | | Материальное обеспечение занятия (наглядные, метод. пособия и др.) | Литература | Формы контроля занятий |
|------------------------------|--|-----------------------------|----------------------|----------------------|---|--|------------|------------------------|
| | | лекции | практические занятия | лабораторные занятия | управляемая самостоятельная работа студента | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | ЭЛЕКТРОНИКА (68 ч.) | 34 | | 34 | | | | |
| 1.1 | ЭЛЕКТРОНИКА. Полупроводниковые приборы. Роль и задачи промышленной электроники как технической основы автоматизации. Полупроводниковые материалы (ПМ). Собственная и примесная электропроводность ПМ. Донорные и акцепторные примеси. Электронно-дырочный переход: образование, физические процессы, прямое и обратное смещение перехода, ВАХ, тепловой и электрический пробой. Переход металл-полупроводник. Полупроводниковые резисторы: варисторы, термо-, фоторезисторы. Диоды: СВЧ, выпрямительные, импульсные. Стабилитроны, варикапы, туннельные, обращенные, свето-, фотодиоды. | 2 | | | | Плакаты | [1-5] | |
| 1.1.1 | Вводное занятие. Инструктаж по технике безопасности. | | | 2 | | Плакаты | | |
| 1.2.2 | Тиристоры: динистры, тринисторы, симисторы, одно- и двухоперационные, их устройство, принцип работы, ВАХ, области применения. Оптроны | 2 | | | | | [3] | |
| 1.2.1 | Исследование полупроводниковых диодов и тиристоров. | | | 2 | | Л.Р.1 | [15] | Отчет по ЛР |
| 1.3 | Неуправляемые выпрямители. Структурная схема неуправляемого выпрямителя. Однофазные выпрямители малой и средней мощности: однополупериодный, двухполупериодный с выводом средней точки трансформатора, мостовой. Трехфазные выпрямители: нулевой, мостовой. Коэффициент пульсаций. Внешняя | 2 | | | | Плакаты | [3,5] | |

| | | | | | | | | |
|-------|--|---|--|---|--|---------|-------|-------------|
| | <p>характеристика. Расчет выпрямителей: выбор схемы выпрямителя, типа вентиля, мощности и коэффициента трансформации трансформатора.</p> <p>Фильтры (C, L, LC, RC), понятие о пассивных и активных фильтрах, коэффициент сглаживания фильтра, расчет параметров фильтра</p> | | | | | | | |
| 1.3.1 | Исследование биполярного и полевого транзисторов | | | 2 | | Л.Р.2 | [7] | Отчет по ЛР |
| 1.4 | <p>Управляемые выпрямители.</p> <p>Однофазные и трехфазные управляемые выпрямители с активной и активно-индуктивной нагрузкой. Регулировочные и внешние характеристики.</p> <p>Стабилизаторы напряжения и тока: параметрические и компенсационные, их параметры и характеристики</p> | 2 | | | | Плакаты | [3] | |
| 1.4.1 | Фото-и оптоэлектронные приборы | | | 2 | | Л.Р.3 | [15] | Отчет по ЛР |
| 1.5 | <p>Биполярные транзисторы. Устройство, схемы включения с ОБ, ОЭ, ОК. Основные характеристики и h-параметры. Полевые транзисторы (ПТ). ПТ с управляющим p-n-переходом. Устройство, основные характеристики для схемы включения с ОИ. ПТ с изолированным затвором и встроенным или индуцированным каналом (МДП или МОП-транзисторы). Стоковые и стоко-затворные характеристики, основные параметры</p> | 2 | | | | Плакаты | [3,5] | |
| 1.5.1 | Исследование однофазных выпрямителей с фильтрами | | | 2 | | Л.Р.4 | [7] | |
| 1.6 | <p>Интегральные микросхемы (ИМС). Маркировка и обозначение ИМС. Их классификация. ИМС: полупроводниковые и гибридные, аналоговые и цифровые.</p> <p>Электронные усилители. Однокаскадный усилитель на биполярном транзисторе с ОЭ. Принцип действия, назначение элементов схемы. Статический и динамический режимы каскада, графический и аналитический расчет. Стабилизация рабочей точки. Амплитудная и амплитудно-частотная характеристики.</p> | 2 | | | | | | |
| 1.6.1 | Управляемый преобразователь. | | | 2 | | Л.Р.5 | [15] | Отчет по ЛР |

| | | | | | | | | |
|--------|---|---|--|---|--|---------|--------|-------------|
| 1.7 | Понятие о многокаскадных усилителях, межкаскадные связи, параметры и характеристики. Обратные связи в усилителях. Режимы работы усилительных каскадов (классы усиления). Однотактные и двухтактные усилители мощности | 2 | | | | | [1-5] | |
| 1.7.1 | Исследование стабилизаторов постоянного напряжения и тока | | | 2 | | Л.Р.6 | [7] | |
| 1.8 | Усилители постоянного тока (УПТ), общая характеристика и их особенности. Дифференциальные каскады. Операционные усилители (ОУ): структурная схема, обозначение, основные параметры, общие свойства, амплитудная характеристика. | 2 | | | | | | |
| 1.8.1 | Исследование на ПЭВМ каскада усиления на биполярном транзисторе по схеме с ОЭ. | | | 2 | | Л.Р. 7 | [15] | Отчет по ЛР |
| 1.9 | Использование ОУ для построения аналоговых схем: инвертирующий и неинвертирующий усилитель, сумматор, вычитатель, интегратор, дифференциатор | 2 | | | | Плакаты | [8-11] | |
| 1.9.1 | Исследование операционного усилителя | | | 2 | | Л.Р. 8 | [13] | |
| 1.10 | Избирательные усилители (активные полосовые фильтры) | 2 | | | | Плакаты | [6-11] | |
| 1.10.1 | Исследование операционного усилителя | | | 2 | | Л.Р. 8 | [15] | |
| 1.11 | Импульсные и генераторные устройства. Импульсные устройства. Преимущества импульсного режима перед непрерывным. Передача непрерывного сигнала в виде прямоугольных импульсов. Ключевой режим работы транзистора. Импульсный (нелинейный) режим работы ОУ. Мультивибраторы на ОУ. Генератор гармонических колебаний с мостом Вина | 2 | | | | Плакаты | [3-11] | |
| 1.11.1 | Логические функции и микросхемы | | | 2 | | Л.Р. 9 | [13] | Отчет по ЛР |
| 1.12 | Логические, комбинационные устройства и триггеры. Основные логические операции и их реализация на базе ИМС. Логические элементы ИЛИ, И, НЕ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ, их микросхемная реализация (ТТЛ и КМОП). Таблицы истинности, логические функции. Основные законы и тождества алгебры логики. Комбинационные логические устройства, синтез их в | 2 | | | | Плакаты | [3-11] | |

| | | | | | | | | |
|--------|---|---|--|---|--|----------|---------|-------------|
| | заданном логическом базисе. Комбинационные интегральные микросхемы: дешифратор, сумматор | | | | | | | |
| 1.12.1 | Комбинационные логические схемы | | | 2 | | Л.Р. 10 | [15] | Отчет по ЛР |
| 1.13 | Комбинированные логические схемы | 2 | | | | | [5-10] | |
| 1.13.1 | Исследование арифметико-логического устройства | | | 2 | | Л.Р. 11 | [6-11] | Отчет по ЛР |
| 1.14 | Триггеры: общие понятия, назначение входов и выходов, асинхронные и синхронные, с динамическим и статическим управлением, однотактные и двухтактные. Структурные схемы асинхронного и синхронного <i>RS</i> -триггеров на ЛЭ 2И-НЕ и 2ИЛИ-НЕ, переключающие функции, таблицы переходов и временные диаграммы, условные обозначения. Реализация <i>D</i> -триггера на ЛЭ 2И-НЕ, работа его на примере таблицы переходов и временные диаграммы. <i>T</i> -триггер, <i>JK</i> -триггер | 2 | | | | | [6-11] | |
| 1.14.1 | Исследование триггерных схем. | | | 2 | | Л.Р. 12 | [15] | Отчет по ЛР |
| 1.15 | Цифровые счетчики: последовательные, параллельные, суммирующие, вычитающие, реверсивные. Построение последовательных счетчиков с произвольным коэффициентом счета на <i>T</i> -триггерах. | 2 | | | | | [4-11] | |
| 1.15.1 | Счетчики импульсов и регистров | | | 2 | | Л.Р. 13 | [10-12] | Отчет по ЛР |
| 1.16 | Регистры сдвига (последовательные регистры) и регистры памяти (параллельные). Схемная реализация регистров на <i>D</i> -триггерах | 2 | | | | | [5-10] | |
| 1.16.1 | Исследование аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей. | | | 2 | | Л.Р. 14. | [15] | Отчет по ЛР |
| 1.17 | Цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи | 2 | | | | | [6-10] | |
| 1.17.1 | Зачетное занятие. | | | 2 | | . | [6-10] | Отчет по ЛР |

Список литературы

Основная литература:

1. Гусев, В.Г. Электроника и микропроцессорная техника / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – Москва: : КноРус, 2013. – 798 с.
1. Физические основы электроники : учебное пособие / Ю. А. Смирнов, С. В. Соколов, Е. В. Титов. - Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2013. - 559с.
2. Сборник задач по электротехнике и электронике: учебн. пособие / Ю.В. Бладыко и др. – Минск: Выш. Шк., 2014. – 478с.
3. Матвеевко, И.П. Основы электроники и микропроцессорной техники: учебн. пособие /И.П. Матвеевко – Минск: РИПО., 2016
4. Сорокин, Б.Л. Материалы и элементы электронной техники: [в 2 т.] / В.С. Сорокин, Б.Л. Антипов, Н.П. Лазарева. - Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2015.
5. Калашников, В.И. Электроника и микропроцессорная техника / В. И. Калашников, С. В. Нефедов; под редакцией Г. Г. Раннева. - Москва : Академия, 2012. - 367

Дополнительная литература:

1. Иванов, И.И. Электротехника и основы электроники: [учебник по направлениям подготовки и специальностям в области техники и технологии] / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов. - Санкт-Петербург [и др.]: Лань. - Москва, 2012. - 735 с
2. Основы электроники : учебное пособие для вузов / А. Л. Марченко. - Москва : ДМК Пресс, 2013. - 292 с
3. Н. К. Трубочкина Нанoeлектроника и схемотехника : [в 2 ч.] / Н. К. Трубочкина; Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики". - Москва : Юрайт, 2016. Головатенко-Абрамова, М.П. Задачи по электронике / М.П. Головатенко-Абрамова, А.М. Липидес. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 108 с.
4. Электроника : практикум: учебное пособие для студентов учреждений высшего образования / Ю. В. Бладыко. - Минск : ИВЦ Минфина, 2016. - 188, [1] с.

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Валентная связь - взаимное притяжение атомов, приводящее к образованию молекул и кристаллов. Принято говорить, что в молекуле или в кристалле между соседними атомами существуют химическая связь. Валентность атома показывает число связей, образуемых данным атомом с соседними атомами.

Акцепторные примеси - атомы химических элементов, внедренные в кристаллическую решетку полупроводника и создающие дополнительную концентрацию дырок. Акцепторными примесями являются химические элементы, внедренные в полупроводник с большей, чем у примеси, валентностью.

Донорные примеси - атомы химических элементов: - внедренные в кристаллическую решетку полупроводника; и - создающие дополнительную концентрацию свободных электронов. Донорными примесями являются химические элементы, внедренные в полупроводник с меньшей, чем у примеси, валентностью.

Диффузия - явление самопроизвольного проникновения одного вещества в другое вещество, обусловленное тепловым движением атомов, молекул, ионов и других частиц. Скорость протекания процесса диффузии зависит от рода диффундирующих веществ и температуры

Объемный заряд - атом примеси, потерявший один электрон, превращается в неподвижный положительный ион, связанный в узле кристаллической решетки, т.е. происходит ионизация атомов примеси. Положительный заряд иона примеси компенсируется отрицательным зарядом свободного электрона, и слой полупроводника с примесью остается электрически нейтральным, если свободный электрон не уходит из этого слоя. В случае ухода электрона в другие слои полупроводникового кристалла неподвижные заряды ионов примеси образуют нескомпенсированный положительный объемный заряд.

Катод – один из электродов электровакуумного или полупроводникового приборов, соединенный с отрицательным полюсом источника электрического тока.

Анод – один из электродов электровакуумного или полупроводникового приборов, соединенный с положительным полюсом источника электрического тока.

Инжекционная электролюминесценция - возникает при прямом включении p - n – перехода. В n -область инжектируются избыточные дырки, а в p - область — электроны, т. е. часть носителей проникает в переход и прилегающие к нему области и рекомбинирует с носителями заряда противоположного знака, испуская при этом кванты света. Рекомбинация может происходить также с участием уровней примеси. При рекомбинации электронов и дырок в этом слое возникает свечение. Цвет свечения при инжекционной электролюминесценции зависит от материала-основы и природы примесей.

Внутренний фотоэффект в кристаллических полупроводниках и некоторых диэлектриках состоит в том, что под действием света электропроводимость этих веществ увеличивается за счет возрастания в них числа свободных носителей тока - электронов проводимости, то есть происходит переход электрона из одной энергетической зоны (валентной) в другую (проводимости)

Внешний фотоэффект – испускание электронов из одной среды в другую под воздействием квантов электромагнитного излучения (фотонов).

Динатронный эффект – изменение тока в электровакуумных приборах, обусловленное возникновением вторичной электронной эмиссии с поверхности электродов под воздействием электронной бомбардировки.

Дрейф носителей заряда – движение электронов и дырок под воздействием электрического поля.

Инжекция электронов – введение (вбрасывание) избыточных электронов в полупроводник под воздействием электрического поля.

Эмиттер – (лат. *emittere* испускать, излучать) 1) излучатель; 2) электрод, который является источником электронов при воздействии внешних причин (нагревание, электрическое поле и т. д.).

Коллектор – (от позднелат. *collector* собиратель), электрод биполярного транзистора, принимающий носители заряда

Эмиттерный переход – p - n переход в транзисторе между эмиттером и базой.

Коллекторный переход – p - n переход в транзисторе между базой и коллектором.

Каскад – схема одноступенчатого усилителя, построенная на одном усилительном элементе (лампа, биполярный или полевой транзистор).

ОЭ, ОК, ОБ – включение биполярного транзистора по схеме с общим эмиттером, общим коллектором, общей базой.

ОИ, ОС, ОЗ – включение полевого транзистора по схеме с общим истоком, общим стоком, общим затвором.

ОК, ОА, ОС – включение лампы по схеме с общим катодом, общим анодом, общей сеткой.